

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

**PAR  
MUSHOMBE MUMA**

**IMPACTS DE L'UTILISATION DES SOLS SUR LA VARIABILITÉ  
SPATIO-TEMPORELLE DES DÉBITS EXTRÊMES  
AU QUÉBEC MÉRIDIONAL**

**DÉCEMBRE 2008**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## RÉSUMÉ

Il existe une controverse sur les effets du couvert forestier sur les caractéristiques des débits extrêmes. Au Québec, plusieurs études se sont intéressées aux impacts de l'agriculture sur la charge solide et la qualité de l'eau. À notre connaissance, il n'existe pas encore d'études portant sur les impacts du couvert végétal sur la variabilité spatio-temporelle des débits extrêmes. Ce travail avait pour but de comparer la variabilité spatio-temporelle des débits extrêmes des bassins versants de faible taille ( $< 5000 \text{ km}^2$ ) en fonction de leur couvert forestier. L'analyse de la variabilité spatiale repose sur l'analyse de 36 bassins versants dont les débits étaient mesurés entre 1960 et 1990. Quant à l'analyse de la variabilité temporelle des débits extrêmes, elle a porté sur 9 bassins versants durant la période de 1934-2000.

En ce qui concerne la variabilité spatiale des caractéristiques des débits extrêmes, l'application de l'analyse canonique des corrélations et la méthode de proportionnalité a révélé que les bassins versants caractérisés par des faibles surfaces forestières ( $< 60\%$ ) présentent des débits minimums plus faibles. Les autres caractéristiques des débits minimums ne sont pas significativement influencées par la superficie des forêts. Il en est de même des caractéristiques des débits maximums. La diminution de la magnitude des débits minimums a été attribuée à une hausse de l'évaporation de l'eau du sol dans les bassins versants à faible couvert forestier. Quant à la variabilité temporelle, aucune influence de la superficie des forêts n'a été détectée. Cette variabilité sera influencée exclusivement par le climat. Il ressort ainsi de cette étude que la diminution de la superficie des forêts semble affecter peu la variabilité spatio-temporelle des débits extrêmes.

## DÉDICACE

À mes enfants

Ndugu-Mushombe Bakary Muma

Undugu-Mali Yal'Omba Muma

Bitisho Matumaini Muma

Anna Apolina Muma

*Dans l'espoir que les mères de demain réaliseront que s'il y a tant de souffrances, tant d'assassinats, tant de peines dans le monde d'aujourd'hui, c'est parce que les mamans ont cessé de vivre pour la joie de leurs enfants.*

## REMERCIEMENTS

« Il faut tout un village pour éduquer une personne humaine » dit un proverbe africain. Ainsi, je tiens à remercier vivement :

- Le Professeur Ali A. Assani, mon directeur, pour son professionnalisme et ses directives qui m'ont éclairé et guidé tout au long de ce travail;
- Le Professeur Jean-François Quessy, mon co-directeur, pour m'avoir initié aux copules, un domaine d'actualité en hydrologie;
- Les Professeurs Guy Samson et Mhamed Mesfioui d'avoir accepté de faire partie de mon comité d'orientation;
- Mr. Pierre-André Bordeleau pour sa disponibilité dépassant tout commentaire quand j'avais besoin de l'un ou de l'autre logiciel;
- La famille Mwenda Seremba pour m'avoir sans relâche encouragé à rester debout devant les vicissitudes de l'existence et la fragilité de la vie;
- Ceux qui de loin ou de près n'ont cessé non seulement de me témoigner de la chaleur humaine mais aussi de m'encourager à aller de l'avant dans la lutte pour la vie, plus particulièrement Béatrice Njamiko.

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	i
DÉDICACE .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
TABLE DES MATIÈRES .....	iv
LISTE DE SYMBOLES .....	vii
LISTE DES FIGURES .....	viii
LISTE DES TABLEAUX .....	x
Chapitre I INTRODUCTION .....	1
1.1. CONTEXTE DU PROJET DE RECHERCHE .....	1
1.2. INFLUENCE DES CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES SOLS SUR LE CYCLE DE L'EAU .....	3
1.2.1. Cycle de l'eau .....	3
1.2.2. Processus d'écoulement dans le cycle hydrologique .....	3
1.2.3. Impacts hydrologiques des forêts .....	6
1.2.4. Effets de l'agriculture sur le cycle de l'eau .....	9
1.3. PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE .....	13
Chapitre II MÉTHODOLOGIE .....	16
2.1. PROBLÈME D'ÉCHELLE SPATIALE D'ANALYSE .....	16
2.2. MÉTHODES DE QUANTIFICATION DES EFFETS D'AFFECTATION DES SOLS SUR LES DÉBITS .....	18
2.2.1. Appariement des bassins ou bassins comparatifs .....	18
2.2.2. Bassins expérimentaux .....	19
2.2.3. Technique de modélisation ou simulation .....	20
2.2.4. Méthode de groupement des bassins .....	21
2.3. SOURCE DE DONNÉES ANALYSÉES .....	22
2.4. CARACTERISATION DES DEBITS ET CHOIX DE VARIABLES HYDROLOGIQUES .....	25
2.4.1. Caractérisation des débits .....	25
2.4.2. Constitution des séries hydrologiques à analyser .....	27
2.4.3. Définition des saisons .....	29
2.5. ANALYSE DES IMPACTS DE CHANGEMENT D'AFFECTATION DES SOLS SUR LES DÉBITS DE CRUE ET D'ÉTIAGE .....	30
2.5.1. Choix de la méthode d'analyse .....	30
2.5.2. Méthodes statistiques pour analyser les effets de changement d'affectation des sols sur la variabilité spatiale des débits .....	30
2.5.2.1. La méthode d'analyse des corrélations canoniques .....	30
2.5.2.2. La méthode de proportionnalité .....	32

2.5.3. Méthodes statistiques pour analyser les effets de changement d'affectation des sols sur la variabilité temporelle des débits .....	32
2.5.3.1. Analyse de la corrélation sérielle .....	32
2.5.3.2. Test de Mann-Kendall .....	34
2.5.4. Analyse de dépendance avec les copules .....	37
2.5.4.1. Définition d'une copule .....	38
2.5.4.2. Description de plusieurs modèles de copules .....	39
2.5.4.3. Tests d'adéquation .....	41
Chapitre III RÉSULTATS : DÉBITS D'ÉTIAGE .....	43
3.1. VARIABILITÉ SPATIALE .....	43
3.1.1. Analyse canonique .....	43
3.1.2. Analyse de proportionnalité .....	43
3.2. VARIABILITÉ TEMPORELLE .....	47
3.2.1. Corrélation sérielle .....	47
3.2.2. Analyse de tendance : Test de Mann-Kendall .....	49
3.2.3. Les Copules .....	54
3.2.3.1. Degré de dépendance entre les caractéristiques des débits d'étiages .....	54
3.2.3.2. Modélisation de la dépendance entre les caractéristiques des débits minimums .....	57
3.3. CONCLUSION .....	59
Chapitre IV RÉSULTATS : DÉBITS DE CRUE .....	60
4.1. VARIABILITÉ SPATIALE .....	60
4.1.1. Analyse canonique .....	60
4.1.2. Analyse de proportionnalité .....	62
4.2. VARIABILITÉ TEMPORELLE .....	64
4.2.1. Corrélation sérielle .....	64
4.2.2. Analyse de tendance : Test de Mann-Kendall .....	67
4.2.3. Les Copules .....	71
4.2.3.1. Degré de dépendance entre les caractéristiques des débits de crue .....	72
4.2.3.2. Modélisation de la dépendance entre les caractéristiques des débits maximums .....	74
4.3. CONCLUSION .....	76
Chapitre V DISCUSSION ET CONCLUSION GÉNÉRALE .....	77
5.1. ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES DÉBITS EXTRÊMES .....	78
5.1.1. Magnitude des débits minimums extrêmes .....	78
5.1.2. Magnitude des débits maximums extrêmes .....	81

5.1.3. Influence de la couverture forestière sur la variabilité spatiale des autres caractéristiques des débits extrêmes .....	82
5.2. ANALYSE DE LA VARIABILITÉ TEMPORELLE .....	83
BIBLIOGRAPHIE .....	84
ANNEXES .....	97



## LISTE DE SYMBOLES

CBV	Classes des bassins versants
$C_1$	Classe des bassins dont le pourcentage forêt est inférieur à 60 %
$C_2$	Classe des bassins dont le pourcentage forêt est compris entre 60 et 90 %
$C_3$	Classe des bassins dont le pourcentage forêt est égal ou supérieur à 90 %
CC	Coefficient canonique
Période 1	Période végétative de mai à juin
Période 2	Période végétative de juillet à août
Période 3	Période végétative de septembre à octobre
$Q_{M^-}$	Moyenne des débits minimums inférieurs au débit le plus élevé de la série (annuelle) saisonnière
$Q_{M^+}$	Moyenne des débits maximums supérieurs au plus faible débit de la série (annuelle) saisonnière
$Q_{MIN}$	Moyenne des débits extrêmes minimums (annuels minimums)
$Q_{MAX}$	Moyenne des débits extrêmes maximums (annuels maximums)
$CV\_Q_{M^-}$	Coefficient moyen de variation de $Q_{M^-}$
$CV\_Q_{M^+}$	Coefficient moyen de variation de $Q_{M^+}$
$CV_{DOCC\_Q_{M^-}}$	Coefficient moyen de variation de la date d'occurrence de $Q_{M^-}$
$CV_{DOCC\_Q_{M^+}}$	Coefficient moyen de variation de la date d'occurrence de $Q_{M^+}$
$DOCC\_Q_{M^-}$	Date moyenne d'occurrence de $Q_{M^-}$ (en jour julien)
$DOCC\_Q_{M^+}$	Date moyenne d'occurrence de $Q_{M^+}$ (en jour julien)
$Durée\_Q_{M^-}$	Durée moyenne d'occurrence de $Q_{M^-}$ (en jour julien)
$Durée\_Q_{M^+}$	Durée moyenne d'occurrence de $Q_{M^+}$ (en jour julien)
NAED	Nombre d'années d'enregistrement des données
PF	Pourcentage de forêt
PEM	Pourcentage des eaux et marais
SBV	Superficie du bassin versant
SF	Superficie de forêt
SEM	Superficie des eaux et marais

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1	
Relation entre l'accroissement des débits annuels et le taux de déboisement .....	2
FIGURE 1.2	
Cycle de l'eau à l'échelle régionale .....	4
FIGURE 1.3	
Exemple du cycle hydrologique terrestre et bilan en mm/an pour la forêt Montmorency .....	4
FIGURE 1.4	
Processus d'infiltration dans le sol et multiplicités des écoulements .....	5
FIGURE 1.5	
Effet de la diminution du couvert végétal sur les débits de crue et d'étiage.....	15
FIGURE 2.1	
Hypothèse d'impact d'utilisation du sol et de variabilité climatique sur la réponse hydrologique comme fonction d'échelle .....	17
FIGURE 2.2	
Croquis d'expérience d'appariement des bassins .....	19
FIGURE 2.3	
Structure schématique du modèle HBV .....	21
FIGURE 2.4	
Localisation des stations étudiées .....	23
FIGURE 2.5	
Classement de six caractéristiques fondamentales de débit.....	26
FIGURE 2.6	
Eau recueillie à Bruxelles-Uccle de 1833 à 1969. Valeurs progressives des statistiques $u(t)$ et $u'(t)$ .....	36
FIGURE 2.7	
Moyennes annuelles de la température de l'air à Bruxelles-Uccle de 1833 à 1969. Valeurs progressives des statistiques $u(t)$ et $u'(t)$ .....	36
FIGURE 3.1	
Droite de proportionnalité des débits extrêmes minimums en fonction de SBV pour les 3 périodes végétatives .....	46
FIGURE 3.2	
Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits d'étiage de la période végétative mai-juin. ....	47

FIGURE 3.3	
Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits d'étiage de la période végétative juillet-août.....	48
FIGURE 3.4	
Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits d'étiage de la période végétative septembre-octobre.....	48
FIGURE 3.5	
Dates d'occurrence des débits minimums du bassin Trois Pistoles de la période de mai-juin de 1934 à 2000 .....	51
FIGURE 3.6	
Débits minimums du bassin Rimouski de la période de juillet-août de 1934 à 2000.....	52
FIGURE 3.7	
Coefficients de variation des débits minimums du bassin Rimouski de la période de septembre-octobre de 1934 à 2000.....	53
FIGURE 4.1	
Droite de proportionnalité des débits maximums en fonction de SBV durant la période juillet-août.....	63
FIGURE 4.1	
Droite de proportionnalité des coefficients de variation des débits maximums en fonction de SF durant la période septembre-octobre .....	63
FIGURE 4.3	
Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits de crue pour la période mai-juin .....	65
FIGURE 4.4	
Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits de crue pour la période juillet-août .....	65
FIGURE 4.5	
Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits de crue pour la période septembre-octobre .....	66
FIGURE 4.6	
Dates d'occurrence des débits maximums du bassin Beaurivage de la période juillet-août de 1934 à 2000 .....	69
FIGURE 4.7	
Coefficients de variation des dates d'occurrence des débits maximums de la période juillet-août du bassin Beaurivage de 1934 à 2000 .....	70
FIGURE 4.8	
Débits maximums de la période mai-juin du bassin Matane de 1943 à 2000 .....	71

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1	
Mesure des impacts d'utilisation du sol par grandeur du bassin.....	17
TABLEAU 2.2	
Liste des bassins étudiés et quelques unes de leurs caractéristiques.....	24
TABLEAU 2.3	
Relation entre les caractéristiques fondamentales de débits et les impacts écologiques .....	26
TABLEAU 2.4	
Définition des caractéristiques et des variables hydrologiques de crue analysées .....	28
TABLEAU 2.5	
Définition des caractéristiques et des variables hydrologiques d'étiage analysées .....	28
TABLEAU 2.6	
Répartition de la période végétative sur les saisons .....	29
TABLEAU 2.7	
Copules archimédiennes à un paramètre .....	40
TABLEAU 2.8	
Copules de valeurs extrêmes à un paramètre.....	40
TABLEAU 2.9	
Copules de la famille de Durante .....	40
TABLEAU 2.10	
Autres copules.....	41
TABLEAU 3.1	
Coefficients de corrélation canonique des débits d'étiage.....	43
TABLEAU 3.2	
Corrélation entre les variables indépendantes et leurs variables canoniques .....	44
TABLEAU 3.3	
Corrélation entre les variables dépendantes et leurs variables canoniques .....	45
TABLEAU 3.4	
Caractéristiques des débits d'étiage affectées par la corrélation sérielle.....	49
TABLEAU 3.5	
Caractéristiques des débits d'étiage dont les données ont démontré une présence de tendance .....	50

TABLEAU 3.6	
Valeurs de tau de Kendall calculées entre les caractéristiques des débits minimums..	56
TABLEAU 3.7	
Modèles de copules sélectionnées pour la dépendance de caractéristiques des débits d'étiage.....	58
TABLEAU 4.1	
Coefficients de corrélation canonique des débits de crue .....	60
TABLEAU 4.2	
Corrélation entre les variables indépendantes et leurs variables canoniques .....	61
TABLEAU 4.3	
Corrélation entre les variables dépendantes et leurs variables canoniques .....	62
TABLEAU 4.4	
Caractéristiques des débits de crue affectées par la corrélation sérielle .....	66
TABLEAU 4.5	
Caractéristiques des débits de crue ayant démontré de tendance significative.....	68
TABLEAU 4.6	
Force de dépendance entre les caractéristiques des débits de crue.....	73
TABLEAU 4.7	
Modèles de copules sélectionnées pour la dépendance des caractéristiques des débits de crue .....	74

# Chapitre I

## INTRODUCTION

### 1.1. CONTEXTE DU PROJET DE RECHERCHE

Les humains, les forêts et l'eau ont un rapport qui date depuis des millénaires. Tout au long de l'histoire, les ressources forestières et hydriques ont été utilisées par les humains, souvent avec un intérêt porté à l'une au détriment de l'autre (Jewitt, 2005).

Les impacts des activités anthropiques sur le cycle de l'eau, perçus souvent comme négatifs (Forsyth, 2005), constituent un problème de plus en plus préoccupant à l'échelle de la planète. En effet, les activités humaines (reboisement et déboisement, l'intensification de l'agriculture, drainage des zones humides et l'urbanisation) peuvent modifier le volume des écoulements ou encore leur rythme. Dans le premier cas, c'est la source globale qui est concernée et dans le second cas, c'est la répartition au cours de l'année, avec la régularisation des écoulements ou au contraire l'exaspération des contrastes entre hautes et basses eaux, ou encore une aggravation des crues. Les changements d'usage des sols ou, plus largement, de gestion des milieux par les sociétés humaines peuvent avoir des conséquences non prévues ou non souhaitables sur les crues et les étiages (Cosandey et al., 2003).

La végétation est un facteur important qui influence le cycle hydrologique. Elle est le milieu par lequel la précipitation doit passer pour atteindre le sol et commencer le retour vers la mer (Aylward, 2005). De ce fait, elle influence la quantité d'eau qui atteint le sol et celle qui revient dans l'atmosphère par le biais d'interception et d'évapotranspiration. Elle influence aussi le volume d'eau qui s'infiltre dans le sol et celui qui ruisselle en surface. Mais cette influence dépend

du type de végétation. Par exemple, le rôle des broussailles est moindre, celui des conifères plus grand (figure 1.1).

Il s'ensuit que toute modification de changement du couvert végétal peut affecter, à des degrés divers, le cycle hydrologique. En effet, cette modification peut altérer aussi les conditions de la surface du sol et de la subsurface (texture et structure des sols). Les impacts hydrologiques qui résultent de ces changements sont souvent groupés sous le terme de changements d'affectation des sols (Aylward, 2005). Ces changements affectent aussi bien la quantité que la qualité de l'eau.

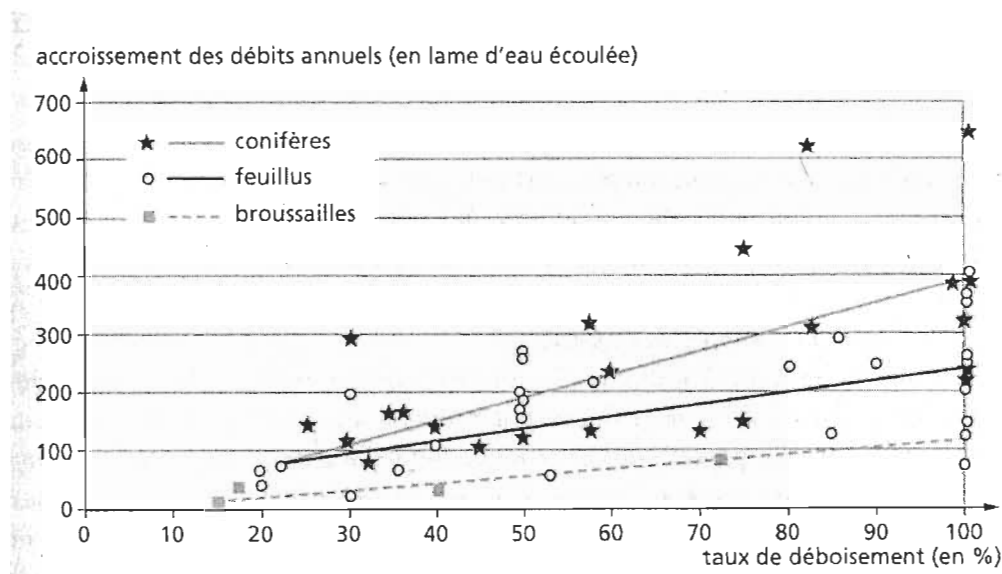


FIGURE 1.1 Relation entre l'accroissement des débits annuels et le taux de déboisement (Cosandey et al., 2003)

Le rôle hydrologique des facteurs physiques du milieu (état de surface du sol, végétation, occupation du sol, etc.) est une des questions actuelles posées aux sciences de l'eau. Beaucoup d'aspects font l'objet d'études et parfois de controverses, notamment lorsqu'on évoque les conséquences des modifications du milieu sur les ressources en eau, les crues, les étiages et l'érosion du sol.

## 1.2. INFLUENCE DES CHANGEMENTS D'AFECTATION DES SOLS SUR LE CYCLE DE L'EAU

### 1.2.1. Cycle de l'eau

En milieu forestier, l'eau est un produit économique et environnemental au même titre que la matière ligneuse ou la faune. Le cheminement de l'eau entre les divers éléments de stockage de l'écosystème forestier constitue la portion terrestre du cycle hydrologique (figures 1.2 et 1.3).

Le cycle de l'eau peut se décrire ainsi (Cosandey et al., 2003) : Une partie de la pluie (P) est d'abord interceptée par la végétation et évaporée (I); celle qui parvient à la surface du sol peut, pour partie, être tout de suite évaporée (E); le restant s'infiltre (F) ou ruisselle (R), contribuant aux écoulements de surface (Q). L'eau qui s'infiltre dans le sol (F) peut être retenue dans la tranche superficielle pour être ultérieurement prélevée par la végétation et transpirée (T); elle peut aussi rejoindre la nappe souterraine. Cette nappe s'écoule lentement vers le cours d'eau dont elle alimente les écoulements (Q). L'évapotranspiration totale (ET) est la somme de I (interception évaporée), E (évaporation physique) et T (transpiration végétale).

Ce cycle s'exprime aussi sous la forme d'un bilan hydrologique dans lequel la précipitation (P) est répartie entre l'écoulement (Q), l'évapotranspiration (ET) et le changement des réserves en eau sur le bassin ( $\Delta R$ ) (Bérard et al., 1996) :

$$P = Q + ET + \Delta R$$

### 1.2.2. Processus d'écoulement dans le cycle hydrologique

Afin de comprendre les effets hydrologiques potentiels de l'agriculture, il est nécessaire de comprendre le processus d'écoulement (figure 1.4) au sein du cycle hydrologique. L'écoulement, qui est la partie de la précipitation qui



apparaît en surface des ruisseaux, est souvent classé comme écoulement de surface, hypodermique ou souterrain (Rallison, 1982).

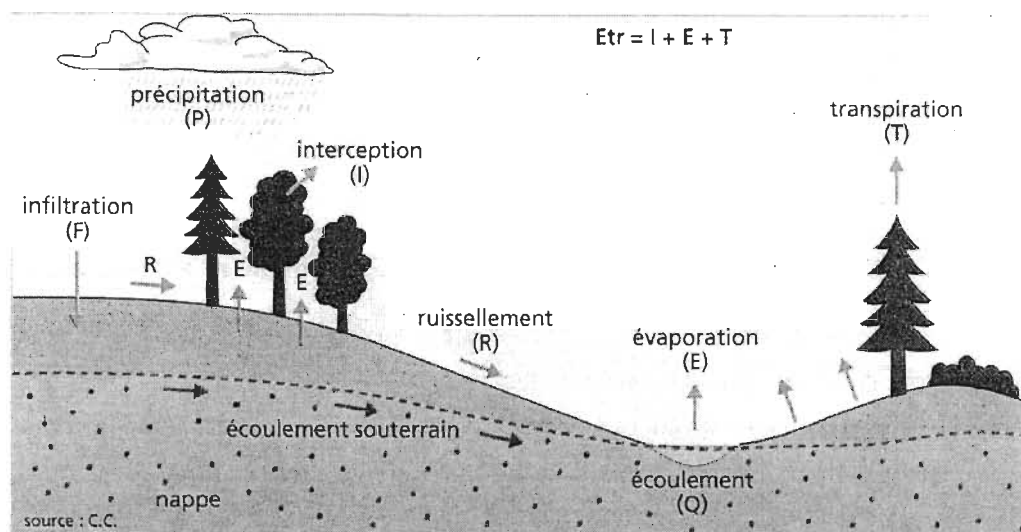


FIGURE 1.2 Cycle de l'eau à l'échelle régionale (Cosandey et al., 2003)

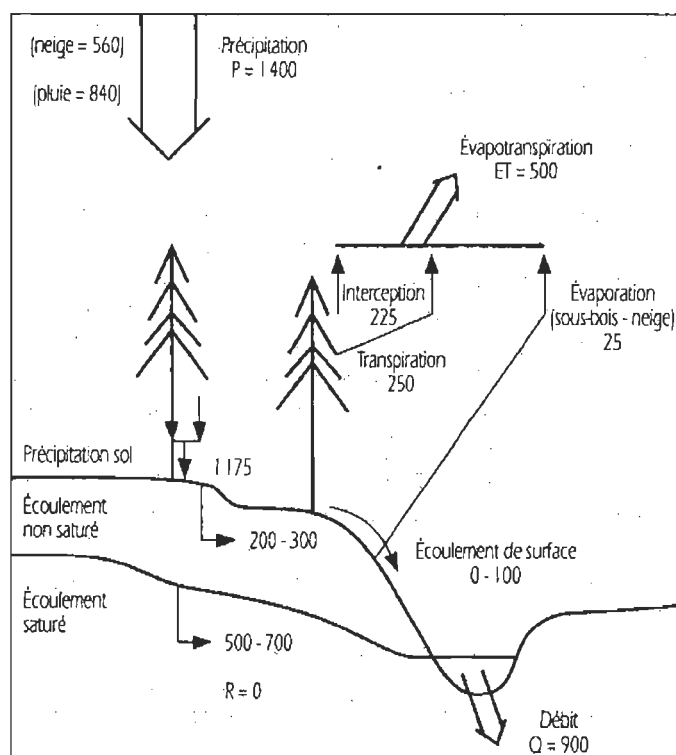
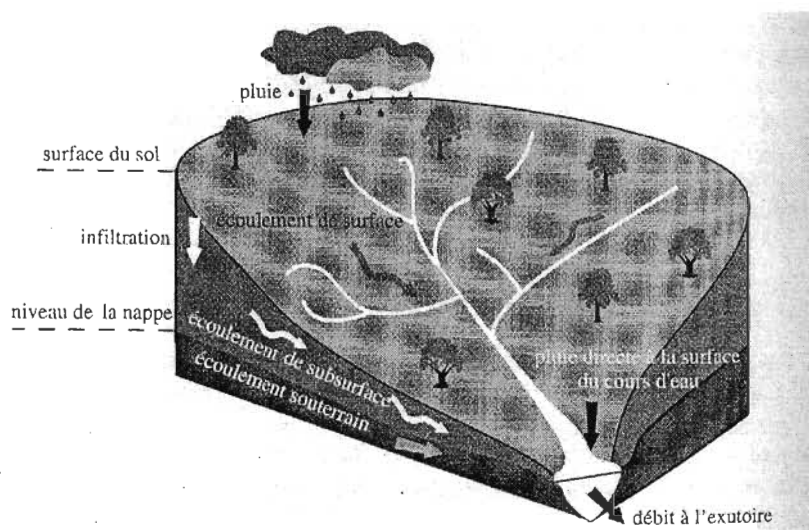


FIGURE 1.3 Exemple du cycle hydrologique terrestre et bilan en mm/an pour la forêt Montmorency (Bérard et al., 1996)



**FIGURE 1.4 Processus d'infiltration dans le sol et multiplicités des écoulements (Musy et Higy, 2004)**

Le ruissellement ou écoulement de surface est l'eau qui voyage sur la surface du sol ou à travers des canaux avant d'atteindre une rivière (Rallison, 1982). C'est toute quantité d'eau qui chemine à la surface du sol. L'écoulement de surface est vite canalisé en un lit dont le degré de définition sur le terrain varie avec la topographie et la nature du matériel dans lequel il se forme (Bérard et al., 1996).

L'écoulement de subsurface ou écoulement hypodermique est l'eau qui s'infiltré dans la surface du sol et se meut latéralement à travers les horizons supérieurs du sol vers la rivière. Cet écoulement emprunte un canal souterrain, juste sous l'humus forestier, ou plus profondément dans le sol, dans des cavités de racines. Bien que caché de la surface du sol, il possède les mêmes caractéristiques que l'écoulement de surface, notamment en ce qui concerne la rapidité des mouvements de l'eau (Bérard et al., 1996).

L'écoulement souterrain est l'eau qui s'infiltré du sol jusqu'au niveau de l'eau souterraine ou la nappe phréatique, et de là, elle se meut latéralement afin de réapparaître dans la rivière. Il peut être en transit à travers l'aquifère pendant de jours, semaines, ou de mois avant qu'il atteigne la rivière (Rallison, 1982).

### 1.2.3. Impacts hydrologiques des forêts

La sagesse conventionnelle (ou mythes) – la perception publique – que les forêts sont, dans toutes les circonstances, nécessairement bonnes vis-à-vis de l'environnement hydrique, qu'elles augmentent la précipitation et le ruissellement, régularisent les débits, réduisent l'érosion et les crues, 'stérilisent' les approvisionnement en eau et améliorent la qualité de l'eau, a été longuement questionnée par la communauté scientifique (Calder, 2002; Kiersch et Tognetti, 2002).

Le degré auquel les forêts influencent le cycle hydrologique, la nécessité d'approvisionner les ressources en eau afin de satisfaire les besoins environnementaux et sociaux, et les questions associées à la gestion de ces deux besoins ont soulevé beaucoup de controverses.

#### a) Les forêts augmentent les précipitations?

Le lien entre les forêts et la précipitation est facile à établir par le fait que plusieurs forêts existent dans de régions pluvieuses – notamment dans des zones montagneuses et des forêts pluvieuses (tropicales). À un niveau, la présence de forêts influencera habituellement la formation de nuage à cause de niveaux plus élevés d'évapotranspiration et d'humidité qui ne sont pas expérimentés sous d'autres utilisations de sol (Forsyth, 2005).

Les météorologistes et les hydrologistes ont fait valoir que c'est principalement la circulation générale de l'air dans l'atmosphère et les caractéristiques topographiques qui affectent la distribution horizontale de la précipitation sur la terre et non la forêt. D'autre part, le déboisement peut même augmenter la précipitation. Par exemple, des terrains dénudés pourraient contribuer plus de poussière sous forme de noyaux de condensation à l'air résultant à plus de précipitation (Chang, 2006).

La forêt peut accroître les précipitations dans certains cas bien particuliers. Dans des zones de brouillards fréquents, en haute montagne ou sur les côtes, l'interception des gouttelettes d'eau par les cimes peut ajouter des quantités d'eau non négligeables au bilan hydrologique local (Bérard et al., 1996).

Quoique les effets des forêts sur les précipitations soient relativement moindres, ils ne peuvent pas être totalement écartés de la perspective de ressources hydriques (Kiersch et Tognetti, 2002).

#### b) Les forêts augmentent les débits d'étiage?

Les débits d'étiage sont affectés par divers impacts anthropiques : le drainage artificiel dans des sols pour l'agriculture ou la construction conduit à l'enlèvement rapide de l'eau du stockage au fond de la vallée et la réduction de la durabilité du drainage latérale pendant la saison sèche (Riggs, 1976; Schulze, 1979; Smithers et Schulze, 1994), les changements du régime de végétation dans la vallée suite au défrichement peuvent modifier les niveaux de perte d'évapotranspiration des sols riverains (Banks, 1961; Rowe, 1963; Schulze, 1979; Swank et al., 1988; Smith et Bosch, 1989; Keppeler et Ziemer, 1990; Meier et al., 1997; Wilgen et al., 1997).

Plusieurs études ont démontré que le reboisement a eu un effet majeur sur les débits d'étiage réduisant leur volume à un degré plus élevé que celui des débits annuels ou totaux (Banks et Kromhout, 1963; Bosch, 1979; Dons, 1986; Trimble et al., 1987; Smith et Scott, 1992; Gustard et Wesselink, 1993; Tallaksen, 1993). Le déboisement a souvent un effet inverse sur le débit total et les débits d'étiages. Il a été démontré que la coupe rase et la récolte du bois augmente le niveau annuel de l'eau, et que dans plusieurs cas ceci est dû à l'augmentation de débits d'étiages saisonniers (Bosch et Hewlett, 1982; Harr et al., 1982; Hetherington, 1982; Keppeler et Ziemer, 1990; Hicks et al., 1991;

Smith, 1991). En bref, l'influence de la forêt sur les étiages est connue : le reboisement a tendance à réduire les débits d'étiage, et le déboisement à les accroître (Andréassian, 2004a, 2004b). Toutes ces connaissances ont été acquises sur de petits bassins versants.

Les impacts de certaines activités anthropiques sur les débits d'étiage (par exemple le déboisement, pompage de l'eau souterraine, ...) ne sont pas toujours bien compris et quantifiés et nécessitent encore d'autres recherches (Smakhtin, 2001).

#### c) Les forêts réduisent les crues?

La présence de la forêt ne prévient toutefois pas les inondations produites par des précipitations exceptionnelles accompagnées ou non de la fonte de la neige (Bérard et al., 1996). Il est admis que la forêt consomme plus d'eau par évapotranspiration qu'un autre type de couvert végétal et qu'à précipitations égales, un bassin forestier donnerait des écoulements moindres à l'exutoire (Cosandey, 1995).

Des études indiquent généralement que souvent ce sont les activités de gestion associées à la foresterie telles que l'agriculture, le drainage, la construction des routes (Jones et Grant, 1996), et le compactage du sol par la machinerie lourde, qui sont plus probables d'influencer et augmenter la réponse des crues que la présence ou l'absence de forêts elles-mêmes (Kiersch et Tognetti, 2002).

Des études hydrologiques forestières menées à travers le monde ont conclu qu'il y a un lien faible entre la couverture du sol et les crues (Hewlett et Helvey, 1970; Hewlett et Bosch, 1984; Kirby et al., 1991; Taylor et Pearce, 1982; Bruijnzeel et Bremmer, 1989). Plus récemment La Marche et Lettenmair (2001), Robinson et al. (2003), Sikka et al. (2003) ont tous conclu que les

impacts de forêt sur les crues sont susceptibles d'être perceptibles seulement pour des événements mineurs et sur des petits bassins. La déforestation a un effet faible pendant les débits extrêmes de pointe du fait que ces événements ont lieu souvent après une précipitation intense, qui remplit la capacité de stockage de l'eau par le sol.

En général, il semble que les crues rares soient peu influencées par le boisement ou le reboisement (Andréassian, 2004b).

#### d) Les forêts : un effet controversé!

La coupe de forêts pour l'agriculture et des raisons industrielles a été condamnée pour la crue et la sécheresse, tandis que dans d'autres régions, l'établissement de la foresterie commerciale a été condamné d'avoir réduit les débits des rivières (Jewitt, 2005). Des recherches nord-américaines n'hésitent pas à promouvoir une gestion nouvelle des bassins forestiers, en considérant que les coupes à blanc sont favorables à l'augmentation de l'écoulement des eaux et donc des ressources utilisables par les hommes, puisque l'évapotranspiration s'en trouve réduite (Bravard et Petit, 2000).

### **1.2.4. Effets de l'agriculture sur le cycle de l'eau**

La couverture de végétation représente l'un des facteurs les plus puissants influençant le régime d'écoulement, du fait qu'elle modifie et modère beaucoup d'autres (Hernandez et al., 2000).

L'irrigation et le drainage – l'irrigation, surtout – sont parmi les pratiques agricoles, celles dont les conséquences sur le cycle de l'eau sont les plus évidentes. Leur importance justifie qu'on leur accorde des études particulières. Plus insidieuses sont les conséquences des modifications d'occupation du sol ou des types de pratiques agricoles dans le bassin lui-même. L'irrigation est de

loin l'activité humaine qui augmente le plus l'évaporation. Quelle que soit la technique utilisée, l'irrigation augmente l'évaporation (les pluies) et diminue les débits, et d'autant plus que les conditions climatiques sont sèches et généralement les ressources en eau faibles. Mais il faut aussi noter que, dans le cas de très grands programmes, l'irrigation est assurée par des barrages qui permettent l'étalement des ressources annuelles en eau, et donc les soutiens d'étiages (Cosandey et al., 2003).

### 1) Évapotranspiration ou Évaporation Totale (ET)

L'influence la plus évidente de l'utilisation du sol sur l'équilibre de l'eau d'un bassin hydrographique est le processus d'évapotranspiration (Calder, 1993).

Différents types d'utilisation du sol ont des évapotranspirations différentes, du fait que différentes espèces cultivées ont des couvertures végétales, des indices de surface foliaire, des profondeurs de racines et des albédos différents (Hasegawa et al., 1998; De Roo et al., 2001). Pendant la saison sèche et périodes de sécheresse, beaucoup d'études ont mis l'accent sur le fait que la transpiration des forêts est probablement plus grande que celle de bassins à d'autres couvertures de sol à cause généralement de la profondeur plus grande et de l'ampleur de leurs racines, qui ont un plus grand accès à l'eau du sol, comparées à d'autres couverts du sol plus courts (Calder 1990 ; Dye, 1996a).

### 2) Précipitation et interception

L'interception par le feuillage est fonction de la densité de la végétation et de la distribution du couvert végétal (Gray, 1972). Des études ont démontré que dans des conditions humides, les pertes par interception seront plus élevées pour les forêts que les cultures plus courtes principalement à cause de

l'augmentation du transport atmosphérique de la vapeur d'eau due à leurs surfaces rugueuses aérodynamiques. En effet, les feuilles captent une quantité d'eau maximum qui varie entre 0,1 et 0,2 mm pour un gazon, 3 mm pour une forêt tempérée et 10 mm pour une forêt tropicale dense; si la pluie excède cette valeur, le supplément d'eau s'écoule alors vers le sol et la fraction interceptée (quotient de la pluie interceptée par la pluie totale) diminue progressivement (Grosclaude, 1999).

La quantité de précipitation interceptée varie avec l'espacement, l'âge et la taille de la plante, et la quantité de précipitation (Penman, 1963; Musy et Higby, 2004; Jewitt, 2005).

### 3) Infiltration

Non seulement que l'infiltration dépend de l'intensité et de la nature de la précipitation, de la condition de la surface du sol, de la température et de la composition chimique de l'eau, des propriétés physiques du sol; mais aussi la nature, le type et la densité du couvert de surface influencent grandement la pénétration de l'eau à la surface.

La modification de l'infiltration de l'eau dans le sol résulte de deux causes principales : le compactage et la suppression de la litière de surface (matière organique non incorporée au sol). L'utilisation de la machinerie lourde pendant la préparation de la terre et l'empiètement animal sur les fermes causent la compaction du sol et réduisent l'infiltration de l'eau (Hölscher et al., 2005).

Les activités de récolte forestière nécessitent l'usage d'un réseau de routes, de sentiers de débardage et de jetées, qui peuvent aussi contribuer à grossir le débit de pointe de cours d'eau. En effet, ces surfaces compactées ou décapées font diminuer le taux d'infiltration de l'eau dans le sol. Cela favorise le ruissellement de surface, qui peut accélérer l'écoulement de l'eau vers le réseau hydrographique (Langevin, 2004).



Dans les forêts, le rôle principal de la litière de surface est de maintenir de bonnes conditions de sol, c'est-à-dire des conditions favorables à l'infiltration. La litière en forêt réduit l'écoulement de surface : au contraire la suppression de la litière réduit le taux d'infiltration (Gray, 1972). Le volume d'eau ruisselé et les pertes en sédiments diminuent quand les niveaux de résidus maintenus à la surface du sol augmentent (Koro, 1993).

Toute réduction d'infiltration après tout changement du couvert du sol occasionne une augmentation du débit de surface pendant la saison pluvieuse (Siriwardena et al., 2006).

#### 4) Écoulement

La conversion de terre humide en production agricole a des implications sur tous les composants de l'écosystème (Bruland et al., 2003). La composition et la distribution des communautés de plantes sont d'une importance fondamentale pour l'évapotranspiration et la génération du ruissellement. Il est bien connu, par exemple, que la réduction de la couverture forestière augmente le ruissellement en diminuant l'évapotranspiration, au moment où le reboisement réduit souvent le ruissellement (Viramontes et Descroix, 2002; Costa, 2003; Gerten et al., 2004; Ziegler et al., 2004, Poff et al., 2006).

Les expériences sur les bassins indiquent, généralement, une réduction de ruissellement sur des surfaces forestières comparées à celles sous végétation plus courte (Kiersch et Tognetti, 2002).

### 1.3. PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE

La conversion de la végétation indigène en terres agricoles a transformé de grande surface du sol de beaucoup de pays (Allan, 1995) et les interventions de l'homme au niveau du bassin versant ont un impact sur la production de la crue (Degoutte, 2006). Les grands massifs forestiers qui occupaient jadis une bonne proportion de la vallée de Saint-Laurent ne sont maintenant plus que de petits îlots, isolés au milieu des terres agricoles (MEQ, 2003).

S'il est vrai que la vallée du Saint-Laurent a connu un déboisement massif au moment de la colonisation au début du siècle, puis à l'occasion de l'ère industrielle de l'après-guerre, on constate depuis la fin des années 60, que son paysage s'est aussi grandement transformé dans certains secteurs, suite à l'intensification de certaines activités agricoles, au développement industriel et à l'étalement de zone urbaine. Par ailleurs, la venue de nouvelles pratiques culturelles et l'intensification de l'agriculture québécoise en général, ont entraîné une diminution importante des milieux forestiers dans le sud du Québec : près de la moitié des MRC du sud-ouest du Québec ont une couverture forestière inférieure à 50% (Bélanger et al., 1999). Ces nouvelles pratiques culturelles se sont traduites aussi par le creusement de nombreux drains susceptibles de modifier les conditions de ruissellement et la dynamique des crues et d'étiages.

Au Québec, les études relatives aux impacts agricoles sur les bassins versants se sont principalement penchées sur la qualité de l'eau et l'érosion des berges et des sols (Auteuil, 1994; Berryman et al., 1994; Conseil consultatif de l'environnement, 1976; Giroux et al., 1997; Giroux, 1993, 1998, 1999; Gosselin et al., 1986; Gratton, 1989; Roberge, 1996). À notre connaissance, excepté quelques études de la récolte forestière sur les débits des rivières (Langevin et Plamondon, 2004; Langevin, 2004), il n'existe pas encore des études exhaustives sur les impacts des changements d'affectation des sols sur la

variabilité spatio-temporelle des régimes de crues et des étiages. Notre étude vise à combler cette lacune en poursuivant les trois objectifs suivants :

1. Comparer la variabilité spatiale des crues et des étiages en fonction de la superficie de bassin versant selon le pourcentage occupé par la forêt. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : les bassins versants ayant une faible couverture forestière seraient caractérisés par des débits de crues relativement élevés mais des débits des étiages relativement bas (figure 1.5).
2. Analyser les changements de conditions de drainage dans les bassins versants agricoles sur la variabilité temporelle des crues et des étiages. L'hypothèse qui sous-tend cet objectif est la suivante : le creusement des réseaux de drains dans les bassins versants agricoles vers les années 50-60 aurait provoqué une hausse des débits de crues et une baisse des débits d'étiages.
3. Les changements induits par le creusement des réseaux de drainage aurait affecté la dépendance entre les caractéristiques de débits avec comme hypothèse : le degré de dépendance de la magnitude aux autres caractéristiques de débits est plus faible dans les bassins versants agricoles que dans les bassins versants non agricoles.

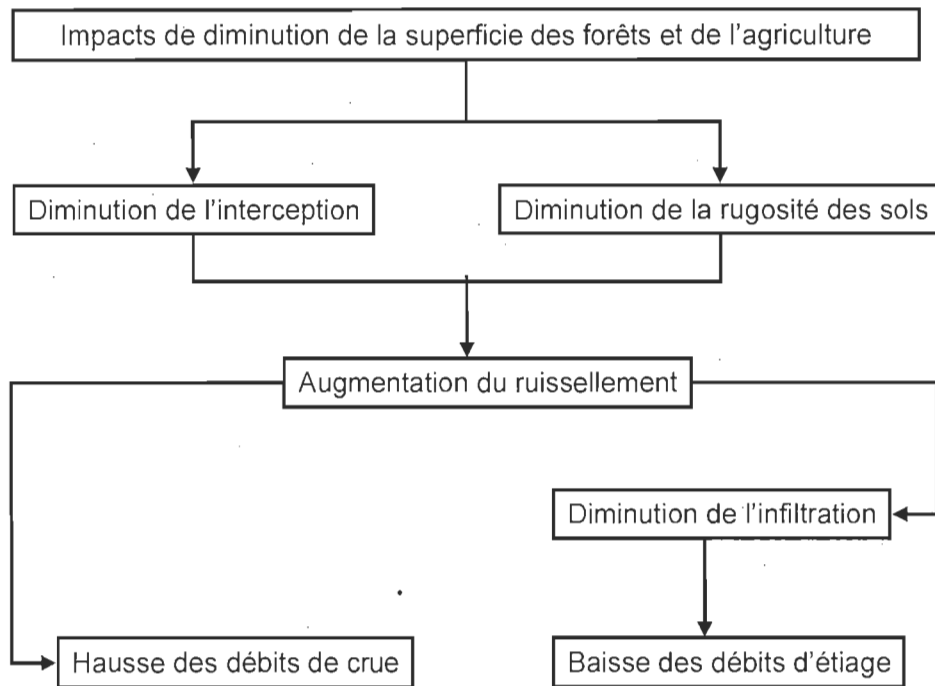


FIGURE 1.5 Effet de la diminution du couvert végétal sur les débits de crue et d'étiage

## Chapitre II

### MÉTHODOLOGIE

#### 2.1. PROBLÈME D'ÉCHELLE SPATIALE D'ANALYSE

Le bassin versant d'un cours d'eau se définit comme le territoire dont les eaux se déversent vers ce cours d'eau. Le cours d'eau et son bassin versant forment un tout indissociable et toute modification du débit en un point donné du cours d'eau peut se répercuter en aval (Langevin et Plamondon, 2004).

Il n'existe pas de classes standardisées de superficie de bassins pour la simple raison qu'une telle classification dépend de l'objectif poursuivi. Pour les fins de l'aménagement du bassin hydrographique forestier, les classes suivantes sont proposées (Bérard et al., 1996) :

- Petit ( $< 15$  à  $25 \text{ km}^2$ );
- Moyen ( $25$  à  $200 \text{ km}^2$ );
- Grand ( $> 200 \text{ km}^2$ ).

Le problème d'échelle est fondamental en hydrologie (Archer, 2003). Le Conseil National Américain de Recherche (US National Research Council, 1991) et Newson (1994) ont identifié le problème d'échelle comme étant un problème majeur non résolu en hydrologie. Comme règle générale, les impacts des activités d'utilisation du sol sur les processus hydrologiques et connexes de sédiment ne peuvent être vérifiés qu'aux échelles plus petites (jusqu'à quelques dizaines de kilomètres carrés) où ils peuvent être distingués de processus naturels et autres sources de dégradation (Wilk et al., 2001; Kiersch et Tognetti, 2002; Archer et Newson, 2002; Caissie et al., 2002; Costa et al., 2003; Bruijnzeel, 2004; Wei et al., 2005).

Le couvert du sol, typiquement, est un phénomène local, ainsi l'impact de n'importe quelle perturbation décroît grandement avec la grandeur du bassin (figure 2.1 et tableau 2.1).

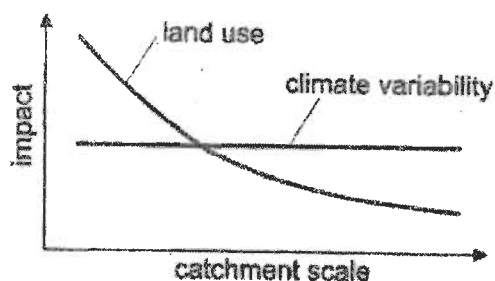


FIGURE 2.1 Hypothèse d'impact d'utilisation du sol et de variabilité climatique sur la réponse hydrologique comme fonction d'échelle (Blöschl et al., 2007)

TABLEAU 2.1  
Mesure des impacts d'utilisation du sol par grandeur  
du bassin (Kiersch et Tognetti, 2002)

Type d'impact	Grandeur du bassin (km <sup>2</sup> )						
	0.1	1	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>
Débit moyen	x	x	x	x	-	-	-
Débit de pointe	x	x	x	x	-	-	-
Débit de base	x	x	x	x	-	-	-
Recharge de l'eau souterraine	x	x	x	x	-	-	-
Charge sédimentaire	x	x	x	x	-	-	-
Nutriments	x	x	x	x	x	-	-
Matières organiques	x	x	x	x	-	-	-
Pathogènes	x	x	x	-	-	-	-
Salinité	x	x	x	x	x	x	x
Pesticides	x	x	x	x	x	x	x
Métaux lourds	x	x	x	x	x	x	x
Régime thermique	x	x	-	-	-	-	-

x = impact mesurable

- = impact non mesurable

## **2.2. MÉTHODES DE QUANTIFICATION DES EFFETS D'AFECTATION DES SOLS SUR LES DÉBITS**

Pour faciliter la comparaison ou l'étude de la quantification de l'effet du couvert forestier sur le cycle hydrologique dans un bassin, des méthodologies de recherche ont été proposées. Pour ce faire, l'appariement des bassins ou les bassins comparatifs, le groupement des bassins, la modélisation et le suivi des bassins (avant et après un traitement donné) sont les méthodes souvent utilisées.

### **2.2.1. Appariement des bassins ou bassins comparatifs**

Le principe du concept d'appariement des bassins est simple et reste la référence de toutes les études d'impacts d'utilisation du sol sur l'hydrologie (Andréassian, 2004). Il est basé sur la sélection de deux bassins (figure 2.2) aussi similaires que possible (en termes de grandeur, morphologie, géologie, climat et utilisation du sol). Cependant, inévitablement, il est naturel que chacun ait ses particularités (la similitude des bassins est toujours sujette à caution).

Alors, ces deux bassins doivent être suivis de près pendant une période donnée de temps pour comprendre leurs différences. Idéalement, cette période préliminaire de calage ou de calibrage pourrait être variée suffisamment afin de caractériser, aussi complètement que possible, l'hydrologie de ces deux bassins (en effet, ils peuvent se comporter très similairement durant la moyenne d'années et se différencier pendant les années sèches).

À la fin de la période de calibrage, l'utilisation du sol peut être modifiée sur l'un des bassins (bassin "traité"), pendant que l'autre reste intact (bassin de "référence" ou de "contrôle"). Toutes les choses étant considérées comme égales par ailleurs, ou prises en compte d'une manière ou d'une autre, les différences observées sont attribuées aux différences de couvert végétal.

Le concept d'appariement des bassins présente deux avantages importants : elle évite les deux problèmes majeurs rencontrés dans des expériences non contrôlées, à savoir les variabilités climatiques et inter-bassins (Andréassian, 2004; Brown et al., 2005).

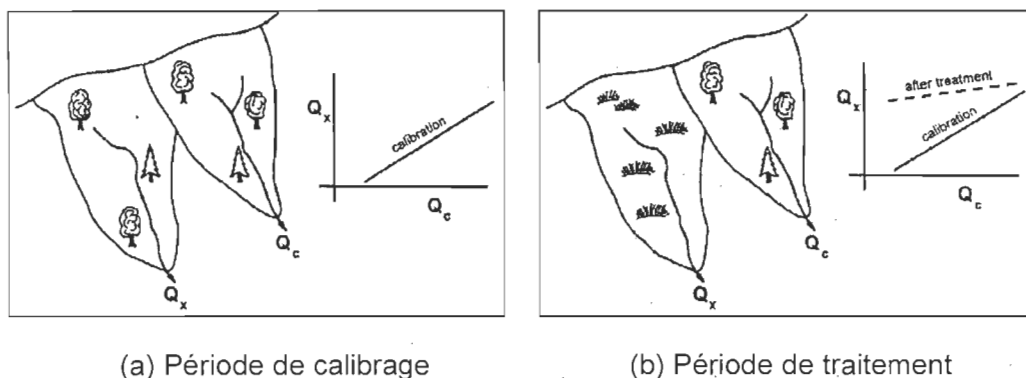


FIGURE 2.2 Croquis d'expérience d'appariement des bassins (Andréassian, 2004)

Cette approche a été utilisée pour examiner l'effet de déboisement ou de reboisement sur le débit des rivières sur de petits bassins (0.1-10 km<sup>2</sup>) (Stednik, 1996; Robinson et al., 2003; Wei et al., 2005, Andréassian, 2004; Brown et al., 2005).

### 2.2.2. Bassins expérimentaux

Pour déterminer les effets hydrologiques de conversion de la végétation sur des grandes surfaces, la méthodologie d'appariement de bassins n'est pas appropriée. Au lieu de cela, il est plus préférable d'étudier un même bassin sur deux différentes périodes de temps : une période avant et une période après le changement ou le traitement (Serrano et al., 1985; Robinson et al., 1991; Caissie et al., 2002; Archer, 2003; Costa et al., 2003; Robinson et Dupeyrat, 2005; Fernandez et al., 2006)

Contrairement à la méthode des bassins comparatifs, qui privilégie l'unité de temps (les études sont simultanées, donc dans les mêmes conditions



climatiques), la méthode des bassins expérimentaux privilégie l'unité de lieu : après une période d'observation, la couverture végétale du bassin considéré est modifiée par une coupe forestière ou un reboisement. Les conséquences hydrologiques sont évaluées par comparaison avec la situation antérieure (Cosandey et Robinson, 2000).

### **2.2.3. Technique de modélisation ou simulation**

Des modèles ont été développés pour déterminer les besoins en eau de différentes végétations. Une fois que ces modèles ont été développés pour différents types de végétation, ils peuvent être utilisés pour prédire l'utilisation de l'eau sur des bassins hydrographiques connaissant la répartition et le pourcentage d'utilisation du sol (Bultot et al., 1990; Roberts et Harding, 1996; Baron et al., 1998; Watson et al., 1999; Hernandez et al., 2000; Niehoff et al., 2002; Moussa et al., 2003; Albek et al., 2004; Ott et Uhlenbrook, 2004; Hope et al., 2004; Mahe et al., 2005; Siriwardena et al., 2006; Thanapakpawin et al., 2006; ). La figure 2.3 montre la structure schématique du modèle hydrologique HBV utilisé sur un sous-bassin.

La plupart des modèles distribués sont basés sur un ensemble de relations dérivées du laboratoire et utilisent l'approche réductionniste pour simuler les processus physiques de base de bassins larges et compliqués. Ceci ne requiert pas seulement un grand ensemble de données de terrain et de paramètres dérivés du laboratoire mais aussi des doutes peuvent surgir concernant l'exactitude et l'applicabilité de ces données à des échelles plus larges (Buytaert et al., 2004).

Sun et al. (2005) ont développé le modèle AET (actual evapotranspiration model) pour examiner la variabilité spatiale et temporelle du rendement en eau et prédire les effets du climat et des changements du couvert forestier à l'échelle régionale à travers le Sud-est des États-Unis (38 bassins). Le rendement annuel en eau ( $Y$ ) sur des bassins moyens peut être estimé par la différence entre

l'entrée de la précipitation ( $P$ ) et la sortie de l'évapotranspiration ( $AET$ ); d'où,  $Y = P - AET$ . Comme indiqué dans cette équation, la précipitation totale, l'évapotranspiration potentielle et les modèles de distribution de type de forêt sont les trois facteurs qui influencent les réponses hydrologiques régionales. Le modèle hydrologique à l'échelle macro VIC (Variable Infiltration Capacity), basée sur la notion de l'indice de la surface de la feuille, a été utilisé pour étudier les effets hydrologiques de la gestion du sol et de l'eau en Amérique du Nord (Mexico, États-Unis et Canada) et en Asie, incluant l'Europe de l'Est (Haddeland, 2007).

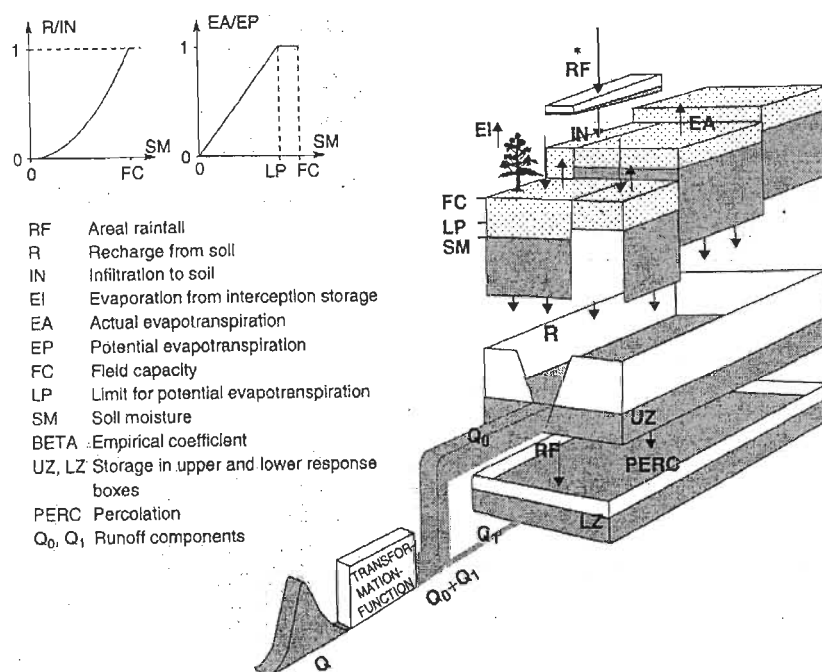


FIGURE 2.3 Structure schématique du modèle HBV (Wilk et al., 2001)

#### 2.2.4. Méthode de groupement des bassins

L'approche de groupement est un outil fondamental et important en analyse statistique. Dans le passé, les techniques de groupement statistique ont été largement utilisées dans divers champs scientifiques comme la psychologie, la zoologie, la biologie, la botanique, la sociologie, la météorologie, la physiognomonie, etc. (Wei et al, 2007). Elle vise à grouper des objets basés sur leurs similarités.

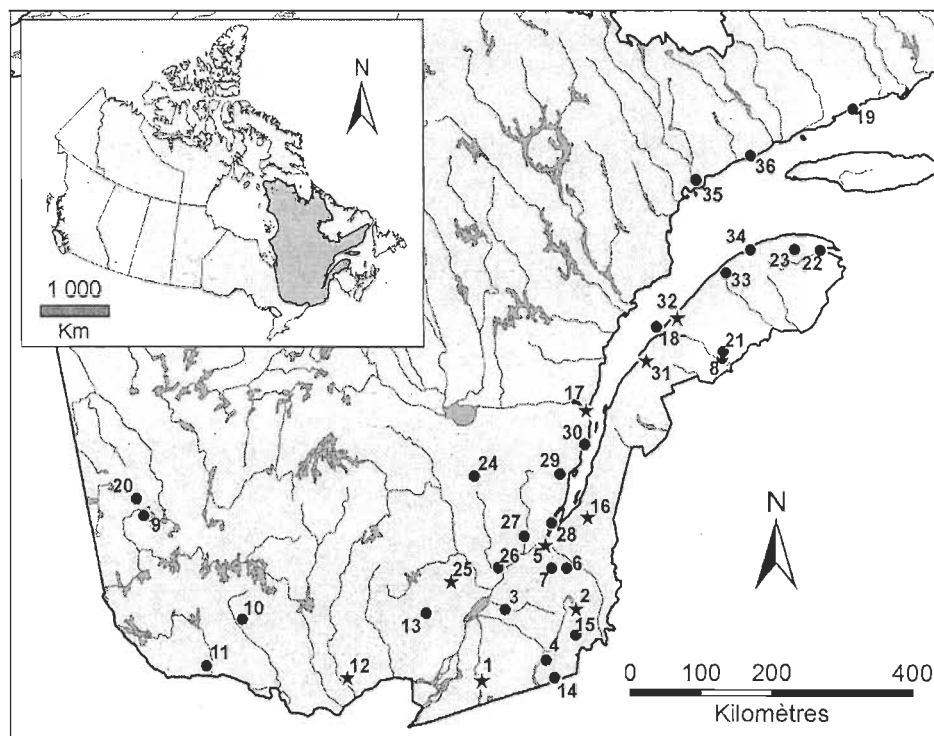
Pour des bassins plus larges ( $> 10 \text{ km}^2$ ), il est très difficile de trouver un bassin témoin (bassin de référence) comparable ou d'appliquer la technique des bassins expérimentaux. Pour ce faire, la solution consiste à recourir à un modèle de régression multivariée afin d'examiner la relation entre le débit et la végétation ou les facteurs environnementaux (Wei et al., 2005).

### **2.3. SOURCE DE DONNÉES ANALYSÉES**

L'étude porte sur trente-six bassins versants, dont la superficie est inférieure à  $5000 \text{ km}^2$  et le nombre d'années d'observation est d'au moins 20 ans (entre la période 1960-1990). Ces bassins versants sont localisés dans la partie méridionale du Québec (figure 2.4). C'est dans cette partie du Québec que l'agriculture s'est beaucoup développée.

Les stations ont été regroupées en trois classes des bassins versants :

- Classe des bassins dont le pourcentage de superficie occupé par la forêt sur le bassin est inférieur à 60 %;
- Classe des bassins dont la forêt occupe entre 60 % et 90 % de la superficie du bassin;
- Classe des bassins où le pourcentage qu'occupe la forêt sur le bassin est égal ou supérieur à 90%.



**FIGURE 2.4 Localisation des stations étudiées : étude spatiale (point), étude spatiale et temporelle (étoile)**

Les données de débits analysés ont été puisées du CD-ROM Hydat publié par Environnement Canada (2000). Cette base de données indique le numéro fédéral et le nom de la station, la magnitude et la date d'occurrence (jour et mois) de débits, la superficie du bassin en amont de la station de jaugeage, les coordonnées géographiques de la station (latitude et longitude) (tableau 2.2).

**TABLEAU 2.2**  
**Liste des bassins étudiés et quelques unes de leurs caractéristiques**

CBV	Bassin	N° Station	SBV (km <sup>2</sup> )	PF (%)	PEM (%)	Latitude (N)	Longitude (W)	NAED
< 60 % (C <sub>1</sub> )	1 Châteauguay	02OA054	2463	31,0	3,0	451710	734810	31
	2 Nicolet SW	02OD001	544	49,0	1,0	454730	715809	31
	3 Nicolet	02OD003	1540	40,0	1,0	460323	721823	24
	4 Coaticook	02OE022	521	57,0	4,0	451706	715358	31
	5 Beaurivage	02PJ007	707	44,0	4,0	463933	711719	31
	6 Bécancour	02PL005	924	53,9	2,8	461822	712705	23
	7 Bécancour	02PL007	2317	47,0	4,0	462208	713721	20
Entre 60 et 90 % (C <sub>2</sub> )	8 Matapédia	01BD002	2734	83,6	2,6	480512	670602	21
	9 Kinojévis	02JB013	2575	88,1	8,2	482151	785129	24
	10 Dumoine	02KJ003	2111	87,0	13,0	464920	775206	23
	11 Dumoine	02KJ004	3729	88,0	12,0	462045	774856	25
	12 Petite Nation	02LD005	1404	81,0	15,0	454730	750529	22
	13 Maskinongé	02OC002	1023	81,3	5,6	461804	730548	25
	14 Hall	02OE018	218	84,0	1,0	450241	712954	31
	15 Eaton	02OE027	642	84,0	4,0	452802	713919	31
	16 du Sud	02PH010	824	74,0	1,0	464914	704525	24
	17 3-Pistoles	02QA001	966	74,0	1,0	480521	691147	31
	18 Blanche	02QB005	208	83,0	3,0	484600	673958	24
	19 Nabisipi	02WA001	2080	86,0	10,0	501511	621244	26
	20 Harricana	04NA001	3704	72,0	23,0	483602	780634	31
≥ 90 % (C <sub>3</sub> )	21 Nouvelle	01BF001	1138	98,2	0,2	480926	662058	27
	22 York	01BH002	1015	98,3	0,4	485003	643730	22
	23 Darmouth	01BH005	630	99,8	0,2	485847	644155	21
	24 Croche	02NE011	1579	96,0	3,0	474602	724412	26
	25 du Loup	02OC004	781	92,0	8,0	463602	731111	25
	26 Batiscan	02PA007	4400	90,0	5,0	463501	722417	23
	27 Sainte-Anne	02PB019	1438	93,4	2,7	465110	715239	25
	28 Montmorency	02PD002	1100	96,0	2,0	465339	710905	26
	29 du Gouffre	02PE009	862	91,0	1,0	472651	703038	23
	30 Malbaie	02PF001	1631	96,0	3,0	474139	701301	23
	31 Rimouski	02QA002	1586	92,0	3,0	482448	683322	28
	32 Matane	02QB001	1647	94,0	1,0	484629	673231	31
	33 Cap-Chat	02QB011	722	97,8	0,4	490323	664020	24
	34 Madeleine	02QC001	1217	99,0	1,0	491210	651744	31
	35 des Rapides	02UB001	554	91,0	8,0	501707	662710	23
	36 au Tonnerre	02VA001	684	93,0	7,0	501657	644658	25

## 2.4. CARACTERISATION DES DEBITS ET CHOIX DE VARIABLES HYDROLOGIQUES

### 2.4.1. Caractérisation des débits

Du point de vue écologique, Richter et al. (1996) et Poff et al. (1997) ont démontré que les débits de rivières peuvent être décrits par les cinq (5) caractéristiques suivantes : la magnitude, la fréquence, la variabilité, la durée et la période d'occurrence de l'écoulement. Selon ces auteurs, chaque caractéristique joue un rôle primordial dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques (tableau 2.3). Ils définirent ainsi pour la première fois les impacts écologiques associés à chaque caractéristique fondamentale de débit. Assani et al. (2005, 2006a, 2006b, 2006c) ont ajouté une sixième : la forme de la courbe de distribution, qui peut être définie par le coefficient d'asymétrie ou d'aplatissement. Cette sixième caractéristique est largement utilisée en hydrologie mais son rôle écologique n'est pas encore prouvé.

Ces six caractéristiques fondamentales peuvent être classées en trois catégories (figure 2.5) : caractéristiques fondamentales primaires, secondaires et tertiaires (Assani, article soumis). Une caractéristique fondamentale est primaire quand elle ne peut pas être définie par rapport à une autre caractéristique fondamentale. C'est le cas de la magnitude. Une caractéristique fondamentale est secondaire lorsqu'elle peut être définie par rapport à une caractéristique fondamentale primaire. C'est le cas de l'occurrence et la durée. Finalement, une caractéristique fondamentale est tertiaire quand elle peut être définie par rapport aux caractéristiques primaires et secondaires. C'est le cas de la fréquence, de la variabilité et de la forme de la courbe de distribution de débits. La variabilité de la magnitude ou de l'occurrence peut être définie. Cette catégorisation est très importante dans la constitution de séries hydrologiques à analyser.

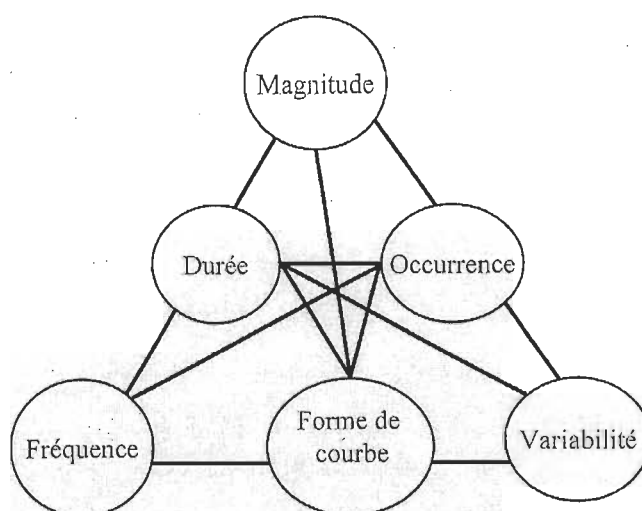


FIGURE 2.5 Classement de six caractéristiques fondamentales de débit.

**TABLEAU 2.3**  
Relation entre les caractéristiques fondamentales de débits et  
les impacts écologiques (Richter et al., 1996)

Caractéristiques	Exemples d'impacts écologiques
Magnitude	Mesure de la disponibilité ou de la convenance de l'habitat et définit tel attribut d'habitat comme superficie humide ou volume d'habitat, ou la position de la nappe phréatique de zone humide ou zones des racines des plantes riveraines.
Durée	Détermine si une phase particulière du cycle de vie peut être complétée ou le degré auquel les effets stressants telle que l'inondation ou la dessiccation peuvent s'accumuler.
Date d'occurrence	Détermine si certaines exigences du cycle de vie sont réunies ou peuvent influencer le degré de stress ou de mortalité associé avec les conditions extrêmes de l'eau comme les crues ou les sécheresses.
Fréquence	Peut être liée aux événements de reproduction ou de mortalité pour certaines espèces, influençant ainsi les dynamiques de population.
Variabilité	Peut être liée à l'échouage de certains organismes le long de bord de l'eau ou dans des dépressions de retenue, ou l'habileté des racines des plantes à maintenir un contact avec l'approvisionnement de l'eau phréatique.

### 2.4.2. Constitution des séries hydrologiques à analyser

Nous avons analysé deux types de séries hydrologiques : les séries des débits maximums journaliers et celle des débits minimums journaliers.

La constitution des séries des débits s'est effectuée de deux manières : la première concerne les débits extrêmes (maximums ou minimums) et la seconde a été faite en plusieurs étapes suivantes :

- À la première étape, nous avons constitué une série saisonnière des débits (série au moyen des valeurs des débits les plus élevées ou les plus faibles mesurées chaque année durant une saison).
- À la seconde étape, pour chaque année, nous avons retenu tous les débits dont les valeurs sont supérieures ou inférieures à  $Q_m$ ,  $Q_m$  étant la valeur la plus faible ou la plus élevée de la série annuelle constituée à l'étape 1. Ainsi, pour chaque année, on a au moins une valeur de débit supérieure ou inférieure à  $Q_m$ . Parallèlement à la série de la magnitude des débits, on aussi constitué des séries de durées (en jours), de coefficients de variation (en %), de dates d'occurrence (en jours juliens), de coefficients de variation des dates d'occurrence de ces débits.
- À la dernière étape, pour chaque année, nous avons calculé les valeurs moyennes des caractéristiques des débits sur les séries partielles constituées à partir de  $Q_m$  (seconde étape) durant la période 1960-1990 pour l'étude spatiale et 1934-2000 pour l'étude temporelle. Au total, nous avons ainsi constitué 5 séries des caractéristiques fondamentales des débits maximums et minimums pour chaque saison (tableaux 2.4 et 2.5). Ces séries sont définies par rapport à la magnitude qui est la caractéristique primaire. Cette approche permet ainsi de tenir compte de la variabilité des débits aussi bien à l'échelle journalière qu'interannuelle.



**TABLEAU 2.4**  
**Définition des caractéristiques et des variables hydrologiques de crue analysées**

Caractéristique	Variable hydrologique	Mode de calcul
Magnitude	$Q_{MAX}$ $Q_{M+}$	Moyenne arithmétique des débits maximums Moyenne arithmétique des débits $> Q_m$ pour chaque année.
Durée de la magnitude	$Durée\_Q_{M+}$	Moyenne arithmétique de nombre de jours pour lesquels les débits ont dépassé $Q_m$
Date d'occurrence de la magnitude	$DOCC\_Q_{M+}$	Moyenne arithmétique des dates (en jours juliens) pour lesquels les débits ont dépassé $Q_m$
Variabilité de la magnitude	$CV\_Q_{M+}$	Moyenne arithmétique des coefficients de variation de la magnitude
Variabilité de la date d'occurrence de la magnitude	$CV_{DOCC\_Q_{M+}}$	Moyenne arithmétique des coefficients de variation des dates d'occurrence de la magnitude

$Q_m$  est la plus faible valeur de la série annuelle des débits maximums

**TABLEAU 2.5**  
**Définition des caractéristiques et des variables hydrologiques d'étiage analysées**

Caractéristique	Variable hydrologique	Mode de calcul
Magnitude	$Q_{MIN}$ $Q_{M-}$	Moyenne arithmétique des débits minimums Moyenne arithmétique des débits $< Q_m$ pour chaque année.
Durée de la magnitude	$Durée\_Q_{M-}$	Moyenne arithmétique de nombre de jours pour lesquels les débits n'ont pas atteint $Q_m$
Date d'occurrence de la magnitude	$DOCC\_Q_{M-}$	Moyenne arithmétique des dates (en jours juliens) pour lesquels les débits n'ont pas atteint $Q_m$
Variabilité de la magnitude	$CV\_Q_{M-}$	Moyenne arithmétique des coefficients de variation de la magnitude
Variabilité de la date d'occurrence de la magnitude	$CV_{DOCC\_Q_{M-}}$	Moyenne arithmétique des coefficients de variation des dates d'occurrence de la magnitude

$Q_m$  est la valeur la plus élevée valeur de la série annuelle des débits minimums

### 2.4.3. Définition des saisons

Dominé par le climat tempéré continental humide, le Québec méridional est caractérisé par des hivers froids et longs, des étés chauds et courts et des précipitations quasi régulièrement réparties tout au long de l'année (Brousseau et Pelletier, 1994). L'intérêt de ce travail porte sur la période végétative répartie du printemps à l'automne. Ainsi, les mois de mai et juin au printemps, juillet et août en été, septembre et octobre en automne sont les périodes pendant lesquelles le sol n'est pas gelé, c'est-à-dire correspondant aux activités agricoles (tableau 2.6). Cette période correspond aussi à celle de la production du ruissellement de surface et d'infiltration.

**TABLEAU 2.6**  
**Répartition de la période végétative sur les saisons**

Saison	Durée	Période végétative
Printemps	Avril – Mai – Juin	Mai – Juin
Été	Juillet – Août	Juillet – Août
Automne	Septembre – Octobre – Novembre	Septembre – Octobre
Hiver	Décembre – Janvier – Février – Mars	-

## **2.5. ANALYSE DES IMPACTS DE CHANGEMENT D'AFFECTATION DES SOLS SUR LES DÉBITS DE CRUE ET D'ÉTIAGE**

### **2.5.1. Choix de la méthode d'analyse**

En ce qui concerne le cadre spatial, de quatre méthodes citées ci haut pour quantifier la relation débit-végétation dans un bassin, seule la méthode de groupement des bassins convient au cadre de cette étude car on ne dispose pas de données des débits avant ou après les changements d'affectation des sols d'une part, et on n'envisage pas d'effectuer des analyses sur des parcelles expérimentales, d'autre part. Cette dernière méthode est onéreuse sur le plan financier et nécessite l'obtention de nombreuses autorisations administratives pour effectuer les expériences.

### **2.5.2. Méthodes statistiques pour analyser les effets de changement d'affectation des sols sur la variabilité spatiale des débits**

#### *2.5.2.1. La méthode d'analyse des corrélations canoniques*

La première étape a consisté à une analyse exploratoire afin de mettre en évidence l'influence du couvert forestier sur la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des débits au moyen de l'analyse canonique des corrélations. Cette méthode permet de corrélérer un groupe des variables dépendantes (caractéristiques des débits) à un groupe des variables indépendantes (facteurs physiographiques des bassins versants). Elle crée des paires de combinaisons linéaires entre chaque groupe de variables (variables hydrologiques et caractéristiques physiographiques : surface de drainage, surface de forêt, surface d'eau et marais, ...) appelées variables canoniques, telles que la corrélation entre les variables canoniques d'une paire est maximisée, et la corrélation entre les variables de paires différentes est nulle (Haché et al., 2002; Lee et Choi, 2007; Lee, 2007; Ogasawara, 2007).

Soient  $x_j = (x_1, \dots, x_p)$  et  $y_k = (y_1, \dots, y_q)$ , où  $p \leq q$ , respectivement l'ensemble  $p$  des variables caractérisant la physiographie des bassins versants et l'ensemble  $q$  des variables hydrologiques et  $x_j^0$  et  $y_k^0$  leurs variables standardisées respectives. Pour chacun de ces groupes de variables standardisées, les variables canoniques sont calculées de la façon suivante (1):

$$v_l = a_{1l}x_1^0 + a_{2l}x_2^0 + \dots + a_{pl}x_p^0 \text{ et } w_l = b_{1l}y_1^0 + b_{2l}y_2^0 + \dots + b_{ql}y_q^0, \quad (2.1)$$

La valeur maximum de  $l$  correspondant au nombre de variables du groupe le plus petit.

Les coefficients de corrélation canonique  $a_{jl}$  et  $b_{kl}$  sont calculés selon les deux critères (2) et (3) :

$$\text{Corr}(w_{l+1}, v_{l+1}) < \text{Corr}(w_l, v_l) \quad (2.2)$$

$$\text{Corr}(w_l, w_{l'}) = 0, \text{Corr}(v_l, v_{l'}) = 0 \text{ et } \text{Corr}(w_l, v_{l'}) = 0 \text{ si } l' \neq l \quad (2.3)$$

Des coefficients de corrélation canonique sont ensuite calculés entre les variables de chacun des groupes originaux et leurs variables canoniques correspondantes pour obtenir ce que certains auteurs appellent des coefficients de structure, de même qu'entre les variables originales d'un groupe et les variables canoniques du groupe opposé.

L'identification des facteurs influençant les variables hydrologiques se fait en 3 étapes :

- i. Identifier quelles paires de variables canoniques  $(w_l, v_l)$  sont significatives au seuil de probabilité de 5 % ;
- ii. Pour chacune des variables  $x$  caractérisant la physiographie des bassins, identifier lesquelles sont significativement corrélées aux axes canoniques (coefficients de structure significatifs) ;
- iii. Pour chacune des variables  $x$  identifiées à l'étape précédente, jumeler cette variable aux variables hydrologiques  $y$  de la variable canonique  $w$  correspondante.

#### 2.5.2.2. La méthode de proportionnalité

L'analyse canonique des corrélations permet d'identifier l'influence du couvert végétal sur la variabilité spatiale des caractéristiques des débits. Elle ne permet pas cependant de déterminer la variabilité spatiale de cette influence en fonction de la taille des bassins versants.

En effet, il est important de savoir si les effets d'affectation des sols sont plus importants pour les petits que pour les grands bassins versants. Pour répondre à cette interrogation, nous allons appliquer la méthode de proportionnalité. Celle-ci consiste à comparer les régressions calculées entre les caractéristiques des débits et la taille des bassins versants en fonction du pourcentage du couvert forestier. Rappelons que selon la classification du tableau 2.2, sept (7) bassins ont un pourcentage de forêt inférieur à 60 %, treize (13) bassins ont un pourcentage de forêt compris entre 60 et 90 % et seize (16) bassins renferment un pourcentage de forêt supérieur ou égal à 90 %. Pour chaque variable hydrologique, nous avons analysé le comportement des bassins versants à faible pourcentage de forêt (< 60 %) par rapport à la tendance générale.

### 2.5.3. Méthodes statistiques pour analyser les effets de changement d'affectation des sols sur la variabilité temporelle des débits

#### 2.5.3.1. Analyse de la corrélation sérielle

Les effets d'affectation des sols peuvent se traduire par une forte dépendance des débits successifs (corrélation sérielle significative). Pour mesurer cette dépendance, nous avons utilisé les notions de variance classique et de variance permutative.

La variance classique,  $s^2$ , mesurant l'importance des fluctuations dans une série statistique, est définie par :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)} \quad (2.4)$$

Établie par une somme de carrés d'écarts, et grâce à la commutativité de l'addition, la variance ne reflète pas l'ordre inhérent de la série, si ordre il y a. Une mesure de variabilité susceptible de refléter l'ordre de la série, la variance permutative,  $s_p^2$ , est définie par :

$$s_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - x_{i+1})^2}{2(n-1)} \quad (2.5)$$

Elle est une statistique de variance basée sur la différence entre valeurs consécutives d'une série (Laurencelle, 1993, 2001). La variance permutative est considérée comme estimateur de la variance lorsqu'il y a une modification continue dans la moyenne de la population échantillonnée. Ce changement de moyenne étant minime pour deux échantillons consécutifs, la différence mesurée refléterait surtout la fluctuation naturelle du phénomène étudiée (Laurencelle, 1983).

Pour tester l'hypothèse d'indépendance d'une source de variables aléatoires uniformes, il suffit en principe d'utiliser  $n$  valeurs successives de la variable, de calculer la statistique  $s_p^2$  selon (2.5), puis de la comparer à une valeur critique. Le tableau 6.4 (Laurencelle, 2001) présente un jeu de valeurs critiques à cette fin. Une valeur significativement basse de  $s_p^2$  indique la présence de corrélation positive des valeurs successives.

D'autre part, pour une série de variables aléatoires supposées normales, on ne connaît pas d'ordinaire la variance  $\sigma^2$  (ni l'espérance  $\mu$ ) de la distribution de sorte le quotient de variance permutative (QVP), constituant un test plus pratique, est définie par :

$$QVP = \frac{s_p^2}{s^2} \quad (2.6)$$

Laurencelle (2001) présente des valeurs critiques du quotient de variance permutative ( $QVP_c$ ) dépendant du nombre d'observations  $n$  et de la probabilité  $P$  dans le cas de données normales. Dans le cas de notre étude, le nombre d'observations étant égal à 67 et à une probabilité  $P = 0.05$ ,  $QVP_c$  est égale à 0.802. La corrélation sérielle existe lorsque  $QVP$  est inférieur à cette valeur.

#### 2.5.3.2. Test de Mann-Kendall

L'objectif de ce test est de vérifier ou de détecter s'il existe éventuellement une tendance (hausse ou baisse des débits dans le temps) dans une série chronologique des données. Ce test est basé sur la statistique de corrélation de rang  $t$  de Kendall (test de Mann).

La statistique Kendall a été originalement conçue par Mann (1945) comme un test non paramétrique de tendance. Plus tard, la distribution exacte du test statistique fut dérivée par Kendall (1975). Le test de Mann-Kendall a été utilisé par d'autres chercheurs dans des applications similaires et se trouva être un outil effectif pour identifier les tendances dans des variables hydrologiques (Westmacott et Burn, 1997). Ces tests sont largement utilisés en science environnementale du fait qu'ils sont simples, robustes et peuvent faire face au manque de certaines valeurs et aux valeurs en dessous de la limite de détection (Libiseller, 2002; Yue et al., 2002).

Comme dans chaque test non paramétrique, et à différence des tests paramétriques, le calcul ne porte pas sur les valeurs numériques des mesures issues des échantillons, mais sur leurs rangs attribués suite au classement des valeurs par ordre croissant. On s'affranchit des conditions de normalité des distributions et d'homogénéité des variances indispensables à la fiabilité des

tests paramétriques. Les données sont rangées chronologiquement et alors chaque point de donnée est successivement traité comme un point de donnée de référence et est comparé à tous les points des données qui suivent dans le temps (Douglas et al., 2000).

Après toutes les manipulations de calcul, on obtient deux fonctions :

$u(t)$  : résultats de l'analyse progressive de la série des  $x$  en appliquant le test de Mann- Kendall aux  $i$  (rangs) des termes de la série avec les valeurs  $t_i$ ;

$u'(t)$  : résultats de l'analyse rétrograde des  $x$  avec les valeurs  $t'_i$ .

Lorsque les valeurs de  $u(t)$  sont significatives, c'est-à-dire qu'elles dépassent en valeur absolue la valeur critique au niveau  $\alpha = 0.05$ , soit 1.96, on conclut à une tendance croissante ou décroissante selon que  $u(t) > 0$  ou  $u(t) < 0$ .

Notons encore qu'en l'absence de toute tendance dans la série, la représentation graphique de  $u_i$  et  $u'_i$  en fonction de  $i$  donne généralement des courbes qui s'enchevêtrent, tandis que dans le cas d'une tendance significative, l'intersection de ces courbes permet de situer approximativement le début du phénomène (Sneyers, 1975; Gerstengarbe et Werner, 1999). Les figures 2.6 et 2.7 donnent des exemples typiques de l'un et de l'autre cas.



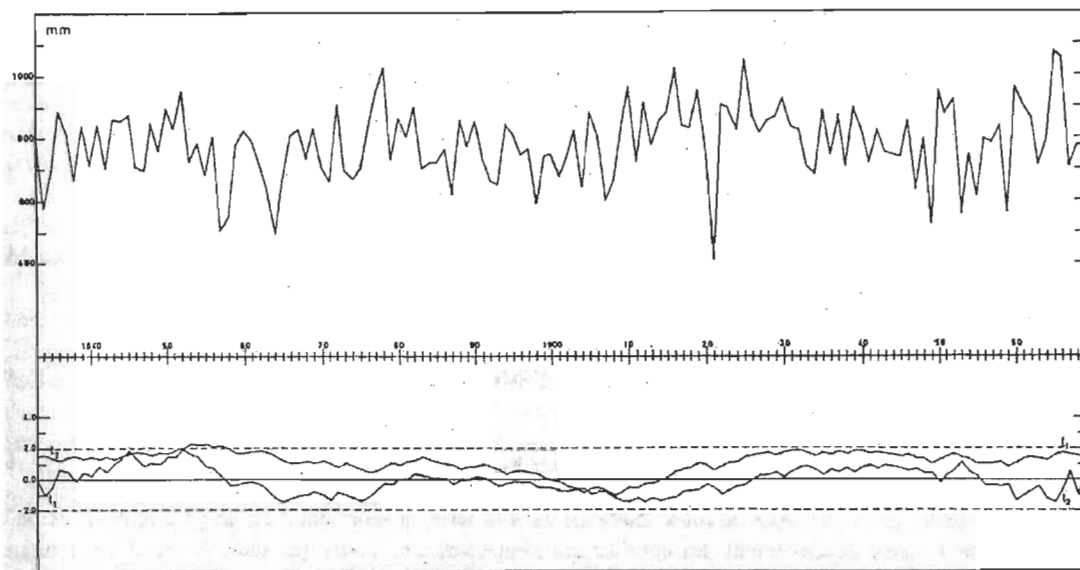


FIGURE 2.6 Eau recueillie à Bruxelles-Uccle de 1833 à 1969. Valeurs progressives des statistiques  $u(t)$  et  $u'(t)$  (Sneyers, 1975)

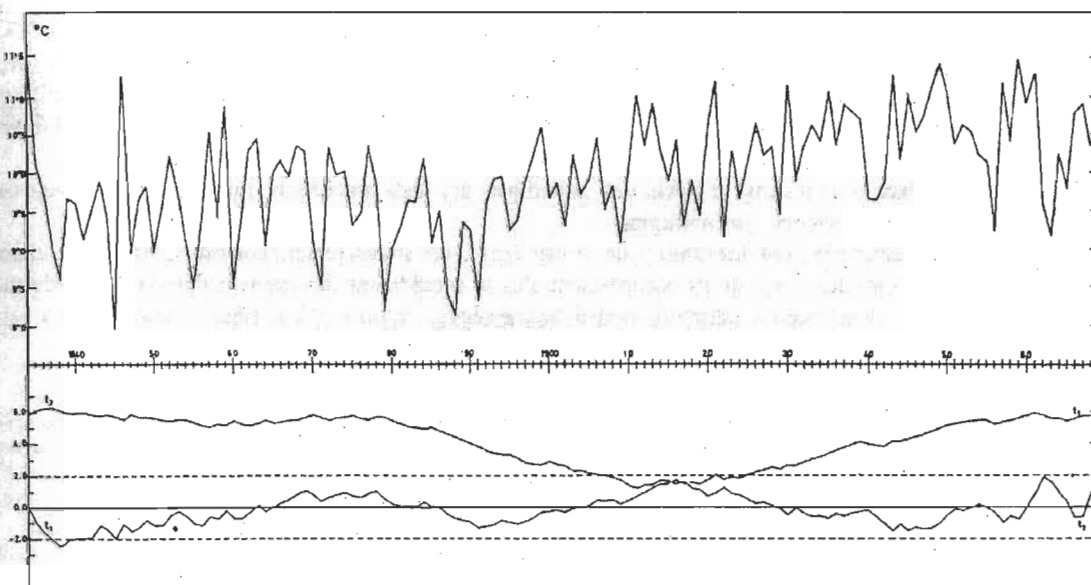


FIGURE 2.7 Moyennes annuelles de la température de l'air à Bruxelles-Uccle de 1833 à 1969. Valeurs progressives des statistiques  $u(t)$  et  $u'(t)$  (Sneyers, 1975)

#### 2.5.4. Analyse de dépendance avec les copules

Dans plusieurs champs de statistique appliquée, comme l'hydrologie, l'analyse multivariée des événements est d'un intérêt particulier. Par exemple, la conception d'un barrage hydroélectrique nécessite l'évaluation des risques associés avec les débits de pointe au futur barrage. Dans plusieurs cas, ces débits de pointe sont le résultat de la combinaison de débits de toutes les rivières tributaires en amont de la localisation d'intérêt. Dans un tel cas, les dépendances entre toutes les quantités, qui définissent les débits de pointe devraient être prises en compte. Ceci implique nécessairement une approche multivariée (Favre et al., 2004).

Des événements complexes tels que les crues et les tempêtes apparaissent toujours comme des événements caractérisés par quelques variables aléatoires corrélés (pointe, volume, durée, etc.). Donc, une analyse de fréquence hydrologique à variable unique peut seulement fournir une évaluation limitée de ces événements (Yue et al., 2001). Étant une question de fait, les événements hydrologiques sont souvent caractérisés par le joint de plusieurs variables aléatoires, et celles-ci ne sont habituellement pas indépendantes : considérons par exemple la durée et l'intensité de la tempête (De Michelle et Salvadori, 2003; Salvadori et De Michelle, 2004), la pointe et le volume de crue (De Michelle et al., 2004), les événements de sécheresse caractérisés par magnitude-durée-intensité (Kim et al., 2003), etc.

Comme conséquence, les événements devraient être bien définis en termes de deux ou plusieurs variables; ceci rend les choses compliquées du fait que la famille d'événements intéressants augmente avec le nombre de variables.

Pour modéliser l'association ou la dépendance entre plusieurs variables aléatoires, non seulement que l'approche par copules offre une avenue

prometteuse mais aussi s'avère un outil de choix dans la pratique moderne de la statistique.

#### 2.5.4.1. Définition d'une copule

La puissance de cette approche tire son origine d'un résultat célèbre de Skar (1959) qui stipule que toute fonction de répartition

$$H(x,y) = P(X \leq x, Y \leq y)$$

admet la représentation

$$H(x,y) = C \{F(x), G(y)\}, \quad (2.7)$$

où  $F$  est la loi de  $X$  et  $G$ , la loi de  $Y$ . Dans cette écriture,  $C$  s'appelle la *copule* de  $(X,Y)$  et contient toute l'information à propos de la dépendance. Ainsi, la copule  $C$  est en quelque sorte un *modèle de dépendance*.

Pour faire la modélisation statistique de  $(X,Y)$ , la représentation (2.7) permet d'effectuer séparément les étapes suivantes :

- 1) Trouver un modèle approprié pour la loi de  $X$ ;
- 2) Trouver un modèle approprié pour la loi de  $Y$ ;
- 3) Trouver un modèle approprié pour la dépendance de  $(X,Y)$ , i.e. la copule.

Les étapes 1 et 2 s'effectuent par des méthodes classiques d'adéquation pour les lois à une variable et ne seront pas explicitées ici.

Pour l'étape de la sélection d'une copule, le sujet est beaucoup plus récent dans la littérature. Dans la section 2, plusieurs modèles de copules seront décrits. À la section 3, trois tests pour sélectionner une copule adéquate sont décrits. Il s'agit des méthodes récentes de Genest et al. (2006, 2008), de Genest et Favre (2007), de Quessy et al. (2007).

#### 2.5.4.2. Description de plusieurs modèles de copules

Une copule  $C$  est une fonction à deux variables définie sur le carré  $[0,1] \times [0,1]$ . Elle satisfait les propriétés de base

$$C(u,1) = u, \quad C(1,v) = v, \quad C(u,0) = 0 \quad \text{et} \quad C(0,v) = 0.$$

De plus, on a

$$C(u_2, v_2) - C(u_1, v_2) - C(u_2, v_1) + C(u_1, v_1) \geq 0$$

quand  $u_1 \leq u_2$  et  $v_1 \leq v_2$ .

Une façon de mesurer la force de la dépendance d'une copule consiste à calculer le tau de Kendall, qui est une mesure d'association définie par

$$\tau_c = 4 \int_0^1 \int_0^1 C(u, v) dC(u, v) - 1 \quad (2.8)$$

Quand les variables sont indépendantes, on a  $\tau_c = 0$ , alors que pour la dépendance la plus forte (dépendance positive parfaite), on a  $\tau_c = 1$ .

Un test alternatif d'indépendance peut se baser sur  $\tau_n$ , puisque sous  $H_0$ , cette statistique est proche de la normale avec une moyenne zéro et une variance  $2(2n+5)/\{9n(n-1)\}$ . Alors,  $H_0$  serait rejeté au niveau approximatif  $\alpha = 5\%$  si

$$\sqrt{\frac{9n(n-1)}{2(2n+5)}} |\tau_n| > 1.96 \quad (2.9)$$

Plusieurs familles de copules à un paramètre sont décrites dans les tableaux 2.6 à 2.9.

Dans leurs observations finales, Favre et al. (2004) affirment que l'étape cruciale dans le processus de modélisation est le choix de la fonction de copule qui s'accommode bien aux données.

**TABLEAU 2.7**  
**Copules archimédiennes à un paramètre**

N°	Modèle	$C_\theta(u, v)$	$\tau_C$
1	Clayton	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\frac{\theta}{\theta + 2}$
2	Ali-Mikhail-Haq	$\frac{uv}{1 - \theta(1-u)(1-v)}$	$\frac{3\theta - 2}{3\theta} - \frac{2(1-\theta)^2 \ln(1-\theta)}{3\theta^2}$
3	Frank	$\frac{1}{\theta} \ln \left\{ 1 - \frac{(1 - e^{\theta u})(1 - e^{\theta v})}{1 - e^{\theta}} \right\}$	$\frac{4}{\theta} - 1 - \frac{4}{\theta^2} \int_0^\theta \frac{t}{e^t - 1} dt$

**TABLEAU 2.8**  
**Copules de valeurs extrêmes à un paramètre**

N°	Modèle	$C_\theta(u, v)$	$\tau_C$
4	Gumbel A	$uv \exp \left\{ -\theta \frac{\ln(u) \ln(v)}{\ln(uv)} \right\}$	$\frac{8 \tan^{-1} \left\{ \sqrt{\theta/(4-\theta)} \right\}}{\sqrt{\theta/(4-\theta)}} - 2$
5	Gumbel B	$\exp \left\{ - \left(  \ln u ^{1/(1-\theta)} +  \ln v ^{1/(1-\theta)} \right)^{1-\theta} \right\}$	$\theta$
6	Galambos	$uv \exp \left\{ (-\ln u)^{-\theta} + (-\ln v)^{-\theta} \right\}^{-1/\theta}$	$\frac{\theta + 1}{\theta} \int_0^1 \left\{ s^{-1/\theta} + (1-s)^{-1/\theta} - 1 \right\}^{-1} ds$

**TABLEAU 2.9**  
**Copules de la famille de Durante**

N°	Modèle	$C_\theta(u, v)$	$\tau_C$
7	Cuadras-Augé	$uv \{ \max(u, v) \}^{-\theta}$	$\frac{\theta}{2 - \theta}$
8	Durante A	$\frac{\min(u, v)}{\{ 1 - (1 - \max(u, v))^\theta \}}$	$1 - \frac{2(7\theta + 2)}{(\theta + 1)(\theta + 2)(2\theta + 1)}$
9	Durante B	$\frac{(\theta + 1)uv}{\theta \max(u, v) + 1}$	$\frac{\theta^3 - 2\theta^2 - 9\theta - 6}{2\theta^3} + \frac{6(\theta^2 + 2\theta + 1) \ln(\theta + 1)}{2\theta^4}$
10	Fréchet	$(1 - \theta) uv + \theta \min(u, v)$	$\frac{(\theta + 1)^2 - 1}{3}$

**TABLEAU 2.10**  
**Autres copules**

N°	Modèle	$C_\theta(u, v)$	$\tau_C$
11	Farie-Gumbel-Morgenstern	$uv + \theta uv (1-u)(1-v)$	$\frac{2\theta}{9}$
12	Plackett <sup>a</sup>	$\frac{1 - \theta(u+v) - D_\theta(u, v)}{2\theta}$	Compliqué ...
13	Normale <sup>b</sup>	$\int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(v)} h_\theta(s, t) ds dt$	$\frac{2}{\pi} \sin^{-1}(\theta)$

$$^a D_\theta(u, v) = \sqrt{\{1 + \theta(u+v)\}^2 - 4\theta(\theta+1)}$$

$$^b h_\theta(s, t) = \left\{ (2\pi)^2 (1 - \theta^2) \right\}^{-1/2} \exp \left\{ - (1/2) (s^2 + t^2 - 2\theta st) / (1 - \theta^2) \right\}$$

#### 2.5.4.3. Tests d'adéquation

En considérant une fonction qui dépend de  $C_\theta$  et une estimation de celle-ci basée sur un échantillon  $(X_1, X_2), \dots, (X_n, X_n)$ , on peut construire un test d'adéquation pour voir si une famille donnée s'ajuste bien aux observations. C'est l'idée développée par Genest et al. (2006, 2008) et Quessy et al. (2007).

##### a) Test d'adéquation basé sur la copule empirique

Il est possible d'estimer directement la copule  $C$  par la copule empirique  $C_n$ . Ensuite, il s'agit de comparer  $C_n$  à une version paramétrique  $C_{\hat{\theta}_n}$ , où  $\hat{\theta}_n$  est un estimateur de  $\theta$ . L'idée est que si l'hypothèse de départ est vraie (i.e. que la copule est de la forme  $C_\theta$ ), alors  $C_n$  devrait être près de  $C_{\hat{\theta}_n}$ . Cette proximité est mesurée avec succès par la statistique

$$\nu_{n1} = n \int_0^1 \int_0^1 \left\{ C_n(u, v) - C_{\hat{\theta}_n}(u, v) \right\}^2 du dv \quad (2.10)$$

On rejette l'hypothèse pour les grandes valeurs de  $\nu_{n1}$ . Les valeurs critiques de rejet s'obtiennent d'une méthode de ré-échantillonnage décrite par Genest et al. (2008).

b) Test d'adéquation basé sur la transformation intégrale de probabilité

Genest et al. (2006) ont basé leur test sur la fonction  $K_\theta(t) = P\{C_\theta(U, V) \leq t\}$ . Plus spécifiquement, ils ont proposé et étudié la statistique

$$\nu_{n2} = n \int_0^1 \left\{ K_n(t) - K_{\hat{\theta}_n}(t) \right\}^2 dK_{\hat{\theta}_n}(t) \quad (2.11)$$

On s'attend à ce que  $K_n$  soit près de  $K_{\hat{\theta}_n}$  si la vraie copule appartient à la famille de modèles  $(C_\theta)$ , ce qui amène à rejeter l'hypothèse pour de grandes valeurs de  $\nu_{n2}$ .

c) Test d'adéquation basé sur la fonction de dépendance de Spearman

Quessy et al. (2007) ont défini la fonction de dépendance de Spearman par  $S(t) = P(UV \leq t)$  et ont proposé un estimateur  $S_n(t)$ . La statistique proposée est :

$$\nu_{n3} = n \int_0^1 \int_0^1 \left\{ S_n(t) - S_{\hat{\theta}_n}(t) \right\}^2 dS_{\hat{\theta}_n}(t) \quad (2.12)$$

## Chapitre III

### RÉSULTATS : DÉBITS D'ÉTIAGE

#### 3.1. VARIABILITÉ SPATIALE

##### 3.1.1. Analyse canonique

###### 1) Coefficients de corrélation canonique

Les valeurs des coefficients canoniques de corrélation sont consignées dans le tableau 3.1 pour les trois périodes végétatives. Il ressort de ce tableau que toutes les valeurs du premier coefficient canonique (CC) sont proches de 1. Ceci dénote un fort lien entre les variables de deux groupes. Toutefois, durant les deux premières périodes (de mai à juin et de juillet à août), un seul coefficient canonique est statistiquement significatif alors que les deux premiers le sont pour la dernière période.

**TABLEAU 3.1**  
**Coefficients de corrélation canonique des débits d'étiage**

CC	Période 1			Période 2			Période 3		
	R <sup>2</sup>	F	Pr > F	R <sup>2</sup>	F	Pr > F	R <sup>2</sup>	F	Pr > F
1	0.98044	12.42	<0.0001	0.98830	9.32	<0.0001	0.96286	9.64	<0.0001
2	0.63780	1.98	0.0531	0.54167	1.60	0.1319	0.63322	2.43	0.0173
3	0.28258	0.63	0.6456	0.37788	1.21	0.3288	0.43482	1.69	0.1792

###### 2) Coefficients de structure de variables indépendantes et dépendantes

L'analyse des coefficients de structure révèle que les trois variables indépendantes (SBV, SF, SEM) sont fortement corrélées à la première nouvelle variable  $V_1$  durant les trois périodes (tableau 3.2). Ainsi, la variance totale expliquée par cette nouvelle variable excède 80%. On notera que la variable la



plus corrélée à  $V_1$  est la superficie des forêts suivie de près par la superficie des bassins versants. Ces corrélations sont positives.

**TABLEAU 3.2**  
**Corrélation entre les variables indépendantes et leurs variables canoniques**

X	Période 1			Période 2			Période 3		
	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
SBV	0.9240	-0.0328	-0.3809	0.9175	0.1800	0.3548	0.9256	-0.2552	0.2794
SF	0.9587	0.2490	-0.1373	0.9652	-0.1602	0.2068	0.9896	-0.1274	-0.0663
SEM	0.8495	-0.4841	0.2099	0.8343	0.4306	-0.3442	0.7611	0.4488	0.4683
VE (%)	83.15	9.91	6.93	82.32	8.12	9.57	80.51	9.43	10.06

En ce qui concerne les variables dépendantes (caractéristiques des débits), il ressort du tableau 3.3 que la première variable canonique  $W_1$  est fortement corrélée positivement à la magnitude des débits minimums ( $Q_{\text{MIN}}$  et  $Q_M$ ). La seconde variable canonique  $W_2$  l'est à la durée ainsi qu'à la date d'occurrence et à sa variabilité durant les deux premières périodes. Toutefois, il faut garder à l'esprit que le coefficient canonique de corrélation associé à  $W_2$  n'est pas statistiquement significatif durant ces périodes.

Il découle de ces résultats que la magnitude des débits minimums est fortement corrélée à la superficie de forêts et à la taille des bassins versants ( $V_1$  étant corrélé à  $W_1$ ) durant les trois périodes analysées. Cette corrélation est positive. En d'autres termes, lorsque la superficie de forêt augmente, la magnitude des débits minimums augmente aussi.

La variance expliquée par  $W_1$  est faible, elle ne dépasse pas 40 %.

**TABLEAU 3.3**  
**Corrélation entre les variables dépendantes et leurs variables canoniques**

	Période 1			Période 2			Période 3		
Y	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>
Q <sub>MIN</sub>	0.986	0.062	0.112	0.974	-0.113	0.126	0.955	-0.052	0.075
Q <sub>M</sub> <sup>-</sup>	0.969	-0.064	0.162	0.966	-0.067	0.202	0.957	-0.124	0.099
Durée_Q <sub>M</sub> <sup>-</sup>	0.220	-0.748	-0.176	0.419	0.463	0.173	0.377	0.459	-0.058
CV_Q <sub>M</sub> <sup>-</sup>	-0.331	-0.417	-0.194	-0.443	0.784	0.361	-0.551	-0.022	0.190
DOCC_Q <sub>M</sub> <sup>-</sup>	0.002	0.773	-0.025	0.354	-0.560	-0.299	0.191	0.568	0.400
CV <sub>DOCC</sub> _Q <sub>M</sub> <sup>-</sup>	-0.009	-0.645	0.340	0.192	0.273	0.629	0.201	0.399	-0.161
VE (%)	34.49	29.24	3.73	40.24	20.56	11.70	39.14	11.84	4.00

### 3.1.2. Analyse de proportionnalité

Rappelons que cette méthode vise à comparer les valeurs des caractéristiques des débits en fonction de la taille des bassins versants afin de déterminer la nature de la relation qui existe entre ces caractéristiques et la superficie des forêts. Elle va établir la relation de forte corrélation entre les caractéristiques de débits et la taille de bassins versants, ces derniers étant groupés selon le pourcentage de forêt. La figure 3.1 (et les annexes A1 à A3) montrent qu'à tailles des bassins versants égales, les débits minimums extrêmes sont plus faibles pour les bassins versants ayant un faible pourcentage des forêts que ceux ayant un pourcentage élevé du couvert forestier. Ce résultat nous permet d'affirmer que la magnitude des débits minimums est fortement influencée par la superficie des forêts. Cette magnitude augmente lorsque le couvert forestier augmente. Ceci confirme le résultat de l'analyse canonique des corrélations.

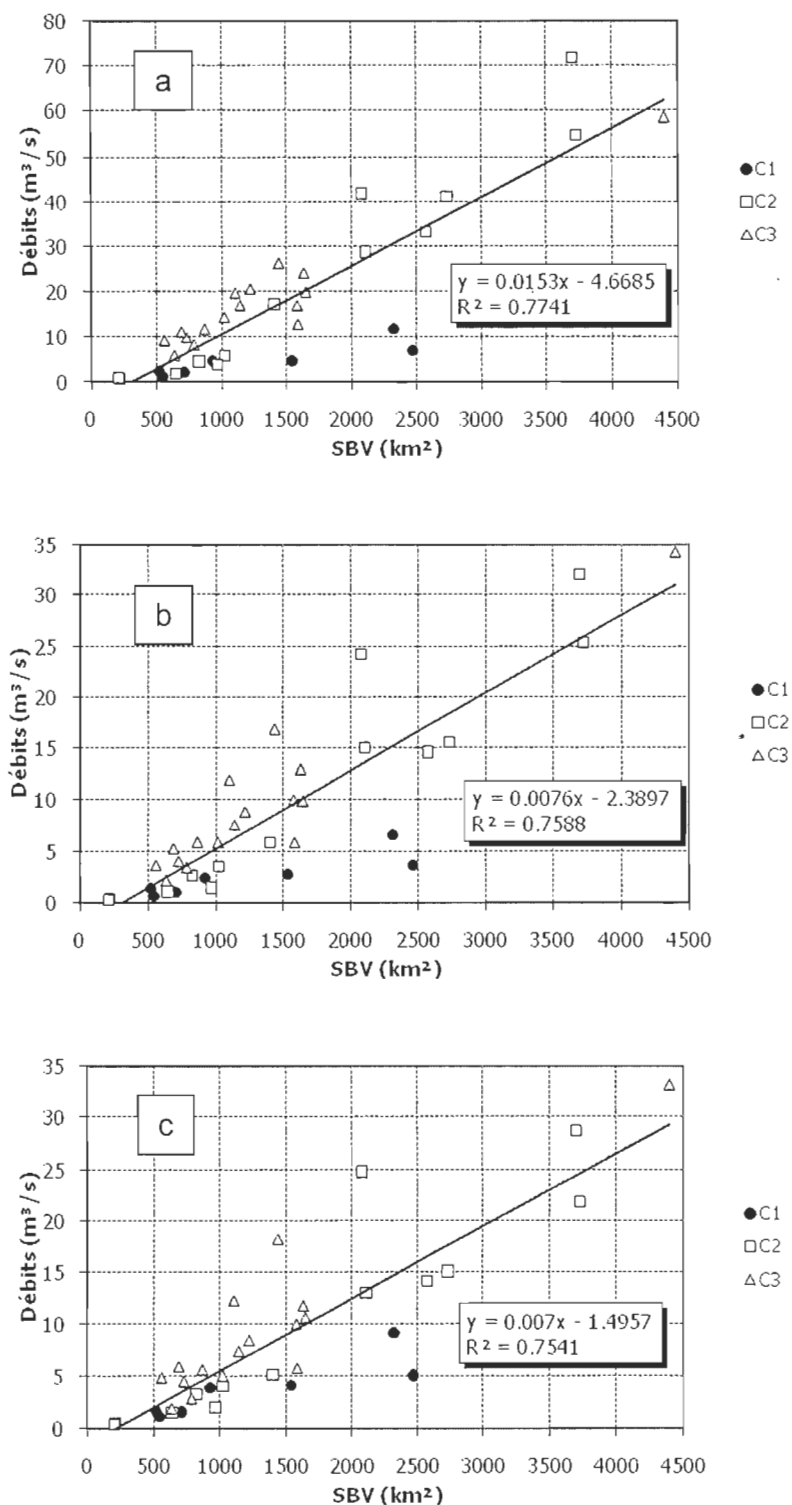


FIGURE 3.1 Droite de proportionnalité des débits extrêmes minimums en fonction de SBV pour les 3 périodes végétatives : a) mai-juin, b) juillet-août et c) septembre-octobre.

C1 : bassins à PF (pourcentage de forêt) inférieur à 60 %, C2 : bassins à PF entre 60 et 90 % et C3 : bassins à PF égal ou supérieur à 90%

## 3.2. VARIABILITÉ TEMPORELLE

Rappelons que cette analyse porte sur neuf bassins versants seulement disposant des mesures continues des débits entre 1934-2000.

### 3.2.1. Corrélation sérielle

Les figures 3.2, 3.3 et 3.4 présentent les valeurs de quotient de variance permutative des caractéristiques de débits d'été et la valeur critique (seuil de signification) du quotient de variance permutative. Presque toutes les caractéristiques de débits ont des valeurs de QVP supérieures à  $QVP_c$  (0.802). Il s'ensuit que peu de séries des débits analysées sont affectées par une corrélation sérielle des débits (tableau 3.7).

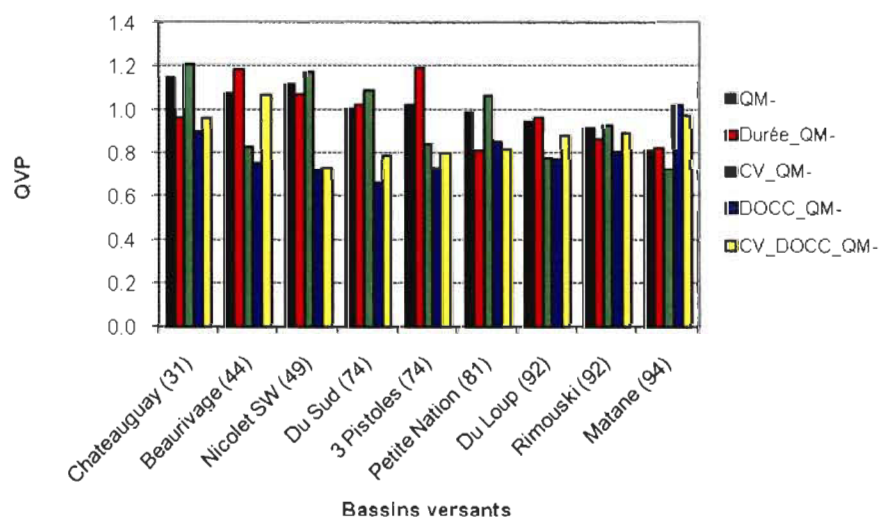
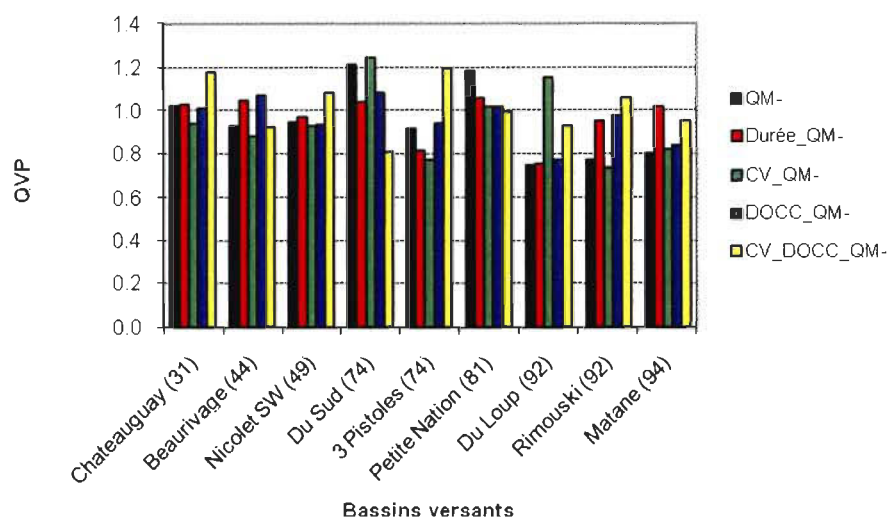
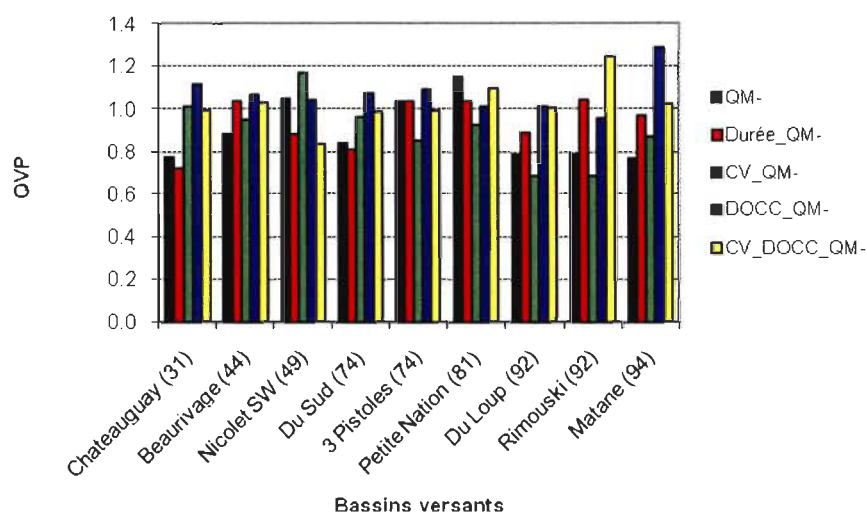


FIGURE 3.2 Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits d'été de la période végétative mai-juin



**FIGURE 3.3** Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits d'été de la période végétative juillet-août



**FIGURE 3.4** Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits d'été de la période végétative septembre-octobre

**TABLEAU 3.4**  
**Caractéristiques des débits d'étiage affectées par la corrélation sérielle**

Saison	Bassin	Caractéristiques
Période 1	Beaurivage	DOCC_ $Q_M^-$
	Nicolet SW	DOCC_ $Q_M^-$ , CV_ DOCC_ $Q_M^-$
	Du Sud	DOCC_ $Q_M^-$ , CV_ DOCC_ $Q_M^-$
	3 Pistoles	DOCC_ $Q_M^-$ , CV_ DOCC_ $Q_M^-$
	Du Loup	CV_ $Q_M^-$ , DOCC_ $Q_M^-$
	Matane	CV_ $Q_M^-$
Période 2	3 Pistoles	CV_ $Q_M^-$
	Du Loup	$Q_M^-$ , Durée_ $Q_M^-$ , DOCC_ $Q_M^-$
	Rimouski	$Q_M^-$ , CV_ $Q_M^-$
Période 3	Châteauguay	$Q_M^-$ , Durée_ $Q_M^-$
	Du Loup	$Q_M^-$ , CV_ $Q_M^-$
	Rimouski	$Q_M^-$ , CV_ $Q_M^-$
	Matane	$Q_M^-$

La comparaison des bassins versants en fonction de leur couvert forestier révèle que celui-ci n'a aucune influence sur la dépendance des termes de séries. En effet, les bassins versants qui ont moins de couvert forestier ne sont pas plus affectés par la corrélation sérielle que ceux qui ont un couvert forestier important.

La période de mai à juin a plus de séries affectées par une corrélation sérielle et la série la plus affectée est la date d'occurrence de la magnitude tandis que pendant la période de septembre à octobre, la magnitude est la série la plus affectée par la corrélation sérielle. Au cours de la saison de juillet à août, il n'y a de série qui soit plus affectée que les autres. De ce qui précède, la série qui est affectée sur les trois périodes est le coefficient de variation de la magnitude.

### 3.2.2. Analyse de tendance : Test de Mann-Kendall

La présence d'une corrélation sérielle significative suggère la non stationnarité des données, c'est-à-dire que la série a tendance à augmenter ou à diminuer avec le temps. Pour mettre en évidence cette tendance, nous avons appliqué le test non paramétrique de Mann-Kendall et la régression linéaire.

Toutefois, en ce qui concerne le test de Mann-Kendall, nous avons appliqué au préalable la correction suggérée par Yue et Wang (2002) pour éliminer cette corrélation sérielle. En effet, la présence de celle-ci a pour conséquence d'introduire une erreur qui se traduit par le rejet plus fréquent de l'hypothèse nulle (absence de tendance). Les résultats du test de Mann-Kendall et de régression linéaire sont résumés au tableau 3.5. Les figures 3.5 à 3.7 présentent quelques exemples des courbes qui découlent du calcul du test de Mann-Kendall et de l'ajustement de la régression linéaire.

**TABLEAU 3.5**  
**Caractéristiques des débits d'étiage dont les données ont démontré**  
**une présence de tendance**

Saisons	Bassin	Caractéristique	Tendance	Année d'occurrence
Période 1	Nicolet SW	$CV_{DOCC\_Q_M^-}$	Croissante	1950
	Du Loup	$CV\_Q_M^-$	Croissante	1962
	Matane	$CV\_Q_M^-$	Croissante	-
Période 2	Du Loup	$Q_M^-$	Décroissante	1983
	Rimouski	$Q_M^-$	Décroissante	1966
		$CV\_Q_M^-$	Croissante	1972
Période 3	Châteauguay	$Q_M^-$	Croissante	1967
	Du Loup	$CV\_Q_M^-$	Croissante	1940
	Rimouski	$CV\_Q_M^-$	Croissante	1965

La faible présence de tendance est dominée par la croissance de la série des coefficients de variation de cinq (5) rivières sur l'ensemble de trois périodes et la décroissance de la magnitude sur deux bassins durant la période de juillet à août.

Quant aux saisons, on n'observe qu'elles n'ont aucune influence sur la présence de cette tendance. Le nombre de rivières affectées par une tendance significative reste quasi le même durant les trois périodes même si leur composition change légèrement d'une période à l'autre. De plus, aucune caractéristique des débits d'aucune rivière n'est affectée par une tendance significative durant les trois périodes. Cependant, la variabilité interannuelle de

la magnitude des débits de quelques rivières est affectée durant les trois périodes.

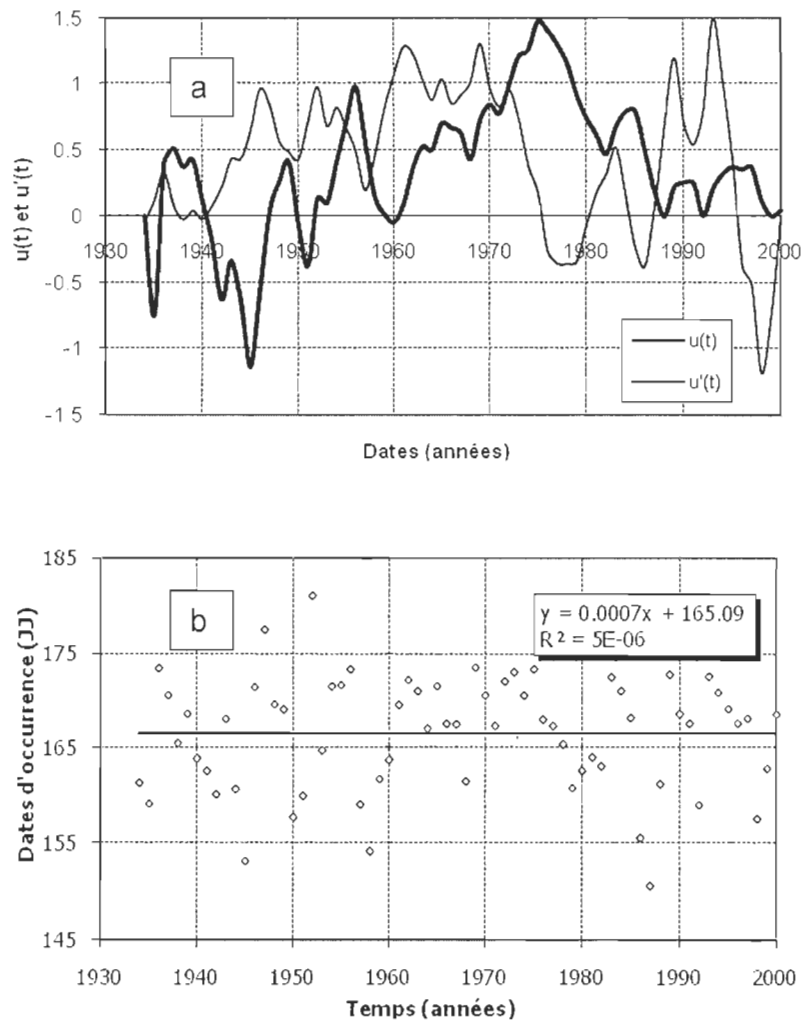


FIGURE 3.5 Dates d'occurrence des débits minimums du bassin Trois Pistoles de la période de mai-juin de 1934 à 2000 : a) Valeurs progressives des statistiques  $u(t)$  et  $u'(t)$  et b) Droite de régression



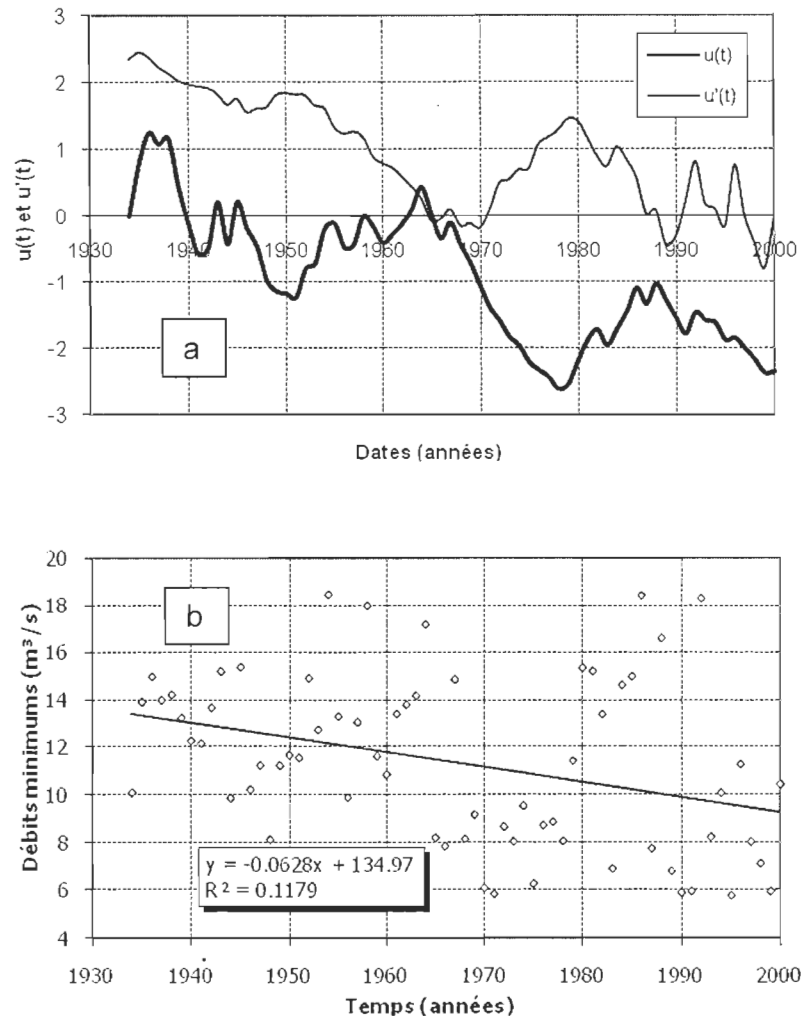
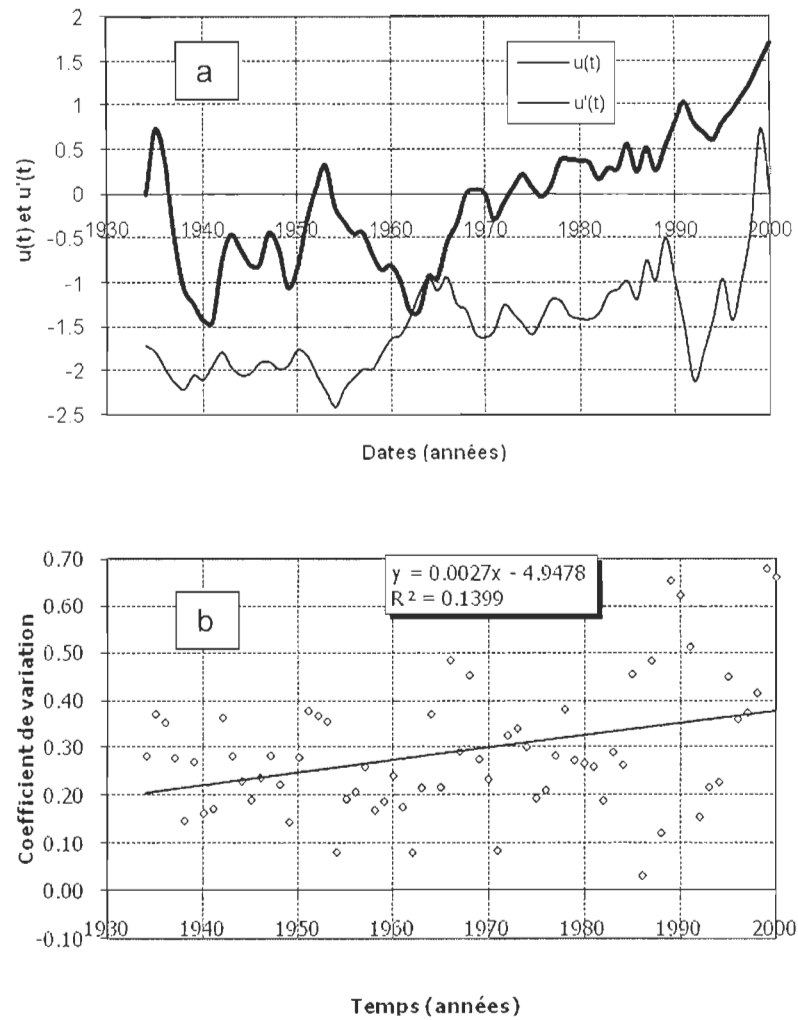


FIGURE 3.6 Débits minimums du bassin Rimouski de la période de juillet-août de 1934 à 2000 : a) Valeurs progressives des statistiques  $u(t)$  et  $u'(t)$  et b) Droite de régression



**FIGURE 3.7 Coefficients de variation des débits minimums du bassin Rimouski de la période de septembre-octobre de 1934 à 2000 : a) Valeurs progressives des statistiques  $u(t)$  et  $u'(t)$  et b) Droite de régression**

Enfin, en ce qui concerne le couvert forestier, ce facteur n'affecte pas la variabilité temporelle des caractéristiques des débits. En effet, ce ne sont pas seulement certaines caractéristiques des débits des bassins versants à couvert forestier relativement faible (Châteauguay et Nicolet du sud-ouest) qui sont affectés par une tendance mais certaines caractéristiques des débits des bassins versants comme Matane, Rimouski et Trois-Pistoles, caractérisés par un couvert forestier très élevé, le sont aussi.

L'analyse spatiale de ces rivières révèle que ce sont les rivières de la rive sud qui sont principalement affectées par une tendance.

En ce qui concerne les années d'occurrence de ces changements (année de rupture des moyennes des séries), le tableau 3.5 révèle que ces changements ne sont pas survenus de manière synchrone aussi bien pour les mêmes caractéristiques des débits que pour les rivières dont quelques caractéristiques sont affectées par une tendance significative. Néanmoins, la plupart de ces changements sont survenus après 1960.

### **3.2.3. Les Copules**

#### *3.2.3.1. Degré de dépendance entre les caractéristiques des débits d'étiage*

La variance permutative mesure le degré de dépendance des termes d'une série. En revanche, les copules mesurent le degré de dépendance entre deux séries hydrologiques (deux caractéristiques des débits). Dans ce dernier cas, ce degré est mesuré au moyen de tau de kendall. Si la valeur de ce tau dépasse 0,16 en valeur absolue, on peut conclure à une dépendance entre les deux séries (caractéristiques) analysées. Ce seuil a été obtenu en remplaçant  $n$  (nombre d'années d'observations = 67) par sa valeur dans l'équation 2.9.

Dans le cadre de ce travail, nous avons calculé le degré de dépendance entre la magnitude et les autres caractéristiques des débits pour les neuf rivières. Rappelons que nous avons analysé les couples des séries suivantes :

- Magnitude – Durée de la magnitude;
- Magnitude – Date d'occurrence de la magnitude;
- Magnitude – Coefficient de variation de la magnitude;
- Magnitude – Coefficient de variation de la date d'occurrence de la magnitude.

Les valeurs du tau de Kendall sont consignées dans le tableau 3.6. Il ressort de ce tableau les faits saillants suivants.

En ce qui concerne les caractéristiques des débits, il existe une dépendance significative entre la magnitude et sa durée d'une part, et entre la magnitude et sa variabilité interannuelle, d'autre part, et ce pour les neuf rivières analysées. Les valeurs de tau de Kendall sont négatives pour les deux couples. En revanche, la magnitude est très peu corrélée avec sa période d'occurrence et la variabilité de celle-ci. De plus, les valeurs de tau de Kendall statistiquement significatives deviennent positives.

Quant aux saisons, on observe que les valeurs de tau de Kendall sont globalement plus élevées pendant la deuxième période (juillet-août) que pendant les deux autres périodes pour le couple magnitude et sa durée. Par contre, pour le couple magnitude et sa variabilité, ces valeurs sont globalement plus élevées durant la première période (mai-juin) que durant les deux autres périodes de la saison.

Enfin, en ce qui concerne le couvert forestier, ce facteur n'a aucune influence sur les valeurs de tau de Kendall. En effet, on n'observe aucune différence entre les bassins versants à couvert forestier élevé et ceux à couvert forestier faible.

TABLEAU 3.6

Valeurs de tau de Kendall calculées entre les caractéristiques des débits minimums

Basins	Saisons			Dépendance entre $Q_M$ - et
	Période 1	Période 2	Période 3	
Châteauguay (31)	-0.4030	-0.4455	-0.3903	Durée_ $Q_M$ -
Beaurivage (44)	-0.5450	-0.5929	-0.5061	
Nicolet SW (49)	-0.3939	-0.5396	-0.4482	
Du Sud (74)	-0.4066	-0.6273	-0.5215	
3 Pistoles (74)	-0.3777	-0.5866	-0.5152	
Petite Nation (81)	-0.3641	0.6219	0.1796	
Du Loup (92)	-0.3008	-0.2917	-0.5568	
Rimouski (92)	-0.2275	-0.4726	-0.3804	
Matane (94)	-0.6110	-0.4500	-0.5052	
Châteauguay (31)	0.1714	0.2501	-0.0140	DOCC_ $Q_M$ -
Beaurivage (44)	0.0837	0.1723	0.0421	
Nicolet SW (49)	-0.0158	0.0213	0.0638	
Du Sud (74)	0.0556	0.1262	-0.0728	
3 Pistoles (74)	-0.1135	0.0502	-0.1606	
Petite Nation (81)	0.2981	0.8661	0.4401	
Du Loup (92)	-0.1624	-0.1325	-0.1633	
Rimouski (92)	0.1226	0.4093	-0.0538	
Matane (94)	0.2175	0.0529	-0.1768	
Châteauguay (31)	-0.6454	-0.2492	-0.4708	CV_ $Q_M$ -
Beaurivage (44)	-0.7142	-0.7558	-0.6671	
Nicolet SW (49)	-0.7503	-0.6074	-0.7096	
Du Sud (74)	-0.5758	-0.6427	-0.5685	
3 Pistoles (74)	-0.7114	-0.6346	-0.6391	
Petite Nation (81)	-0.7531	-0.0701	0.0068	
Du Loup (92)	-0.5685	-0.5685	-0.6517	
Rimouski (92)	-0.6237	-0.5206	-0.4826	
Matane (94)	-0.7341	-0.5179	-0.5341	
Châteauguay (31)	-0.0683	0.4202	0.1506	CV <sub>DOCC_</sub> $Q_M$ -
Beaurivage (44)	0.0005	-0.0592	0.0891	
Nicolet SW (49)	0.1244	0.1398	0.0656	
Du Sud (74)	0.0764	0.2248	0.0258	
3 Pistoles (74)	0.2338	0.0448	-0.0185	
Petite Nation (81)	-0.1868	0.8571	0.5323	
Du Loup (92)	0.1904	0.1352	-0.1117	
Rimouski (92)	0.0158	0.3532	0.1054	
Matane (94)	-0.1578	0.4401	0.1452	

### 3.2.3.2. *Modélisation de la dépendance entre les caractéristiques des débits minimums*

Rappelons ici que sélectionner un modèle de copule approprié pour la dépendance revient à choisir le modèle dont tout au moins l'une des statistiques KK et SS a une valeur de P supérieure à 5% et le paramètre  $\theta$  différent de zéro (annexes A4 et A5).

Le tableau 3.7 donne les modèles de copules sélectionnés pour la dépendance des caractéristiques des débits d'étiage. Les deux couples dont presque toutes les dépendances sont significatives (magnitude et sa durée, magnitude et sa variabilité interannuelle) peuvent majoritairement être modélisés par deux distributions (11 et 13) tandis que les deux autres couples (magnitude et sa date d'occurrence, magnitude et la variabilité de sa date d'occurrence) dont les dépendances significatives sont très peu nombreuses, peuvent être plus ou moins modélisés par une multitude de distribution.

Pour ce qui est des saisons, les deux modèles cités ci-haut conviennent presque à toutes les trois périodes pour la dépendance d'une part, entre la magnitude et sa durée et d'autre part, entre la magnitude et sa variabilité interannuelle. D'une façon générale, les dépendances significatives de deux autres couples ont une multitude de modèles dont la composition change d'une période à une autre.

En dernier lieu, la couverture forestière n'a pas d'influence sur les modèles de copules : il n'y a pas de différence des modèles entre les bassins versants à couvert forestier élevé et ceux à couvert forestier faible.

**TABLEAU 3.7**  
**Modèles de copules sélectionnées pour la dépendance de caractéristiques**  
**des débits d'étiages**

Bassins	Saisons			Q <sub>M</sub> <sup>-</sup> et
	Période 1	Période 2	Période 3	
Châteauguay	11, 13	11, 13	11, 13	Durée_ Q <sub>M</sub> <sup>-</sup>
Beaurivage	11, 13	11, 13	11, 13	
Nicolet SW	11, 13	11, 13	11, 13	
Du Sud	11, 13	11, 13	11, 13	
3 Pistoles	11, 13	11, 13	11, 13	
Petite Nation	1, 11, 13	3, 5, 10, 11, 13	Toutes sauf 6, 8, 9	
Du Loup	11, 13	Aucune	11, 13	
Rimouski	1, 11, 13	11, 13	11, 13	
Matane	11, 13	1, 11, 13	11, 13	
Châteauguay	11, 13	Aucune	13	CV_ Q <sub>M</sub> <sup>-</sup>
Beaurivage	13	6, 11, 13	11, 13	
Nicolet SW	11, 13	11, 13	13	
Du Sud	11, 13	11, 13	11, 13	
3 Pistoles	13	11, 13	11, 13	
Petite Nation	11, 13	-	-	
Du Loup	11, 13	Aucune	11, 13	
Rimouski	11, 13	11, 13	11, 13	
Matane	Aucune	11, 13	11, 13	
Châteauguay	Toutes sauf 8	3, 4, 5, 7, 11, 12, 13	-	DOCC_ Q <sub>M</sub> <sup>-</sup>
Beaurivage	-	Toutes sauf 8	-	
Petite Nation	2, 3, 4, 5, 9, 11, 12, 13	12	4, 5, 9, 10, 11, 12, 13	
Du Loup	-	-	-	
Rimouski	-	1, 2, 4, 9, 10, 11, 12, 13	-	
Matane	Toutes sauf 4, 8, 9	-	1, 11, 12	
Châteauguay	-	Toutes sauf 5, 6, 7, 8	-	CV <sub>DOCC_</sub> Q <sub>M</sub> <sup>-</sup>
Du Sud	-	Toutes sauf 1, 6, 8, 9, 10	-	
3 Pistoles	Toutes sauf 1, 6, 8, 9	-	-	
Petite Nation	1, 11, 13	3, 5, 10, 12, 13	3, 4, 5, 9, 10, 11, 13	
Du Loup	Toutes sauf 8, 9	-	-	
Rimouski	-	Toutes sauf 4, 6, 7, 8	-	
Matane	-	Toutes sauf 6, 7, 8, 9	-	

### 3.3. CONCLUSION

De toutes les caractéristiques de débits étudiées, la magnitude de débits extrêmes minimums ou débits minimums, a été significativement corrélée aux superficies de bassins versants et de forêts tout au long de toutes les saisons (comportement permanent de débits d'étiages). Tous les bassins à faible pourcentage de forêt ont des débits plus faibles. En effet, la diminution de la superficie du couvert végétal diminue l'infiltration des précipitations et favorise l'écoulement de surface.

Le couvert forestier sur le bassin n'ayant aucun effet sur la corrélation sérielle et sur la tendance des séries de caractéristiques de débits d'étiages, il ressort que le creusement des réseaux de drains dans les bassins versants agricoles vers les années 50-60 n'a pas provoqué une baisse de débits d'étiages du fait que ce ne sont pas seulement certaines caractéristiques de débits d'étiages des bassins à faible pourcentage de forêt qui ont fait l'objet d'une corrélation sérielle et/ou de la présence d'une tendance. L'existence de quelques tendances serait le résultat de l'influence climatique sur la variabilité temporelle des débits d'étiages.

Les valeurs du degré de dépendance entre la magnitude et les autres caractéristiques de débits montrent qu'aucune différence n'a été observée entre les bassins versants à couvert forestier élevé et ceux à couvert forestier faible. D'où, les changements induits par le creusement des réseaux de drainage dans les bassins versants agricoles n'ont aucune incidence sur le degré de dépendance de la magnitude aux autres caractéristiques de débits des crues : le degré de dépendance de la magnitude aux autres caractéristiques de débits n'est pas plus faible sur les bassins versants agricoles que sur ceux non agricoles.



## Chapitre IV

### RÉSULTATS : DÉBITS DE CRUE

#### 4.1. VARIABILITÉ SPATIALE

##### 4.1.1. Analyse canonique

###### 1) Coefficients de corrélation canonique

Des valeurs des coefficients canoniques de corrélation consignées dans le tableau 4.1, ce sont celles de deux premiers coefficients canoniques qui sont significatives durant toutes les trois périodes. Le lien entre les variables de deux groupes diminue d'une période à l'autre : la période de mai à juin ayant le lien le plus fort.

**TABLEAU 4.1**  
**Coefficients de corrélation canonique des débits de crue**

CC	Période 1			Période 2			Période 3		
	R <sup>2</sup>	F	Pr > F	R <sup>2</sup>	F	Pr > F	R <sup>2</sup>	F	Pr > F
1	0.95084	11.92	<0.0001	0.93607	8.67	<0.0001	0.90652	6.58	<0.0001
2	0.83176	5.82	<0.0001	0.77433	3.85	0.0005	0.74713	3.24	0.0023
3	0.46874	2.04	0.1147	0.35060	1.02	0.4154	0.30287	0.73	0.5774

###### 2) Coefficients de structure de variables indépendantes et dépendantes

L'analyse des coefficients de structure calculés sur les variables indépendantes révèle que ces dernières sont fortement corrélées à la nouvelle variable  $V_1$  durant toutes les trois périodes (tableau 4.2). Ainsi, la variance totale expliquée par cette nouvelle variable est supérieure à 70%. Il ressort de ce tableau que la variable la plus corrélée à  $V_1$  est la superficie des eaux et marais

suivie par la superficie des forêts pendant la période de mai à juin; tandis que pour les deux dernières périodes, la superficie des forêts est la variable la plus corrélée à  $V_1$  suivie par la superficie des bassins versants.

**TABLEAU 4.2**  
**Corrélation canonique entre les variables indépendantes et leurs variables canoniques**

X	Période 1			Période 2			Période 3		
	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
SBV	0.867	-0.351	-0.354	0.872	0.490	-0.021	0.816	0.555	0.160
SF	0.901	-0.435	0.009	0.977	0.154	-0.147	0.955	0.289	-0.064
SEM	0.917	0.367	-0.155	0.751	0.163	0.640	0.734	0.024	0.679
VE (%)	80.12	14.90	4.99	75.94	9.68	14.38	70.59	13.07	16.33

En ce qui concerne les variables dépendantes, on note du tableau 4.3 que la première variable canonique  $W_1$  est corrélée positivement à la magnitude des débits maximums ( $Q_{M+}$ ) pendant la période juillet-août mais négativement corrélée à la variabilité interannuelle de la magnitude des débits maximums ( $CV\_Q_{M+}$ ) durant la période septembre-octobre. La deuxième variable canonique  $W_2$  est fortement corrélée négativement à la magnitude des débits maximums ( $Q_{MAX}$  et  $Q_{M+}$ ) pendant la première période, positivement à la magnitude des débits maximums ( $Q_{MAX}$ ) et à la variabilité interannuelle des débits maximums ( $CV\_Q_{M+}$ ) pendant la deuxième période. La troisième variable canonique  $W_3$  est fortement corrélée négativement à la magnitude des débits maximums ( $Q_{MAX}$ ) et positivement à la variabilité interannuelle de la date d'occurrence des débits maximums ( $CV_{DOCC\_Q_{M+}}$ ). Cependant, le coefficient de corrélation canonique associé à  $W_3$  n'est pas significatif et aucune variable indépendante n'est corrélée à  $V_2$ , ce qui implique qu'aucun facteur n'est corrélé aux caractéristiques des débits associées à  $W_2$ .

De ces résultats, il découle que la magnitude des débits maximums de la période juillet-août et leur variabilité interannuelle de septembre-octobre sont corrélées avec la superficie de forêts et la taille des bassins versants. La variance expliquée par  $W_1$  est très faible et ne dépasse pas 25 %. Ceci traduit

en fait la faible influence de la superficie des forêts sur la variabilité spatiale de la magnitude.

**TABLEAU 4.3**  
**Corrélation entre les variables dépendantes et leurs variables canoniques**

Y	Période 1			Période 2			Période 3		
	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>
Q <sub>MAX</sub>	0.394	-0.857	0.134	0.327	0.696	-0.619	0.194	0.779	-0.385
Q <sub>M+</sub>	0.560	-0.688	0.104	0.789	0.332	-0.430	0.513	0.592	-0.315
Durée_ Q <sub>M+</sub>	0.542	-0.134	0.513	0.478	0.127	0.474	0.467	-0.182	0.247
CV_ Q <sub>M+</sub>	-0.473	-0.316	0.014	-0.478	0.800	0.289	-0.879	0.030	-0.093
DOCC_ Q <sub>M+</sub>	-0.036	0.177	-0.022	-0.566	0.284	-0.167	-0.018	0.084	0.425
CV <sub>DOCC</sub> _ Q <sub>M+</sub>	0.070	-0.026	-0.377	-0.131	0.206	-0.048	0.089	-0.171	0.671
VE (%)	16.54	22.61	7.58	25.41	22.89	15.11	0.194	0.779	-0.385

#### 4.1.2. Analyse de proportionnalité

La figure 4.1 montre que les débits des bassins à faible pourcentage de forêt n'ont pas un comportement particulier par rapport à ceux des bassins de pourcentage élevé de forêt. C'est-à-dire qu'à tailles des bassins versants égales, on ne peut pas conclure que les débits maximums sont plus faibles pour les bassins à faible pourcentage des forêts que ceux ayant un pourcentage élevé de forêt.

La figure 4.2 montre que la variabilité interannuelle des débits maximums en automne diminue lorsque la superficie de forêt augmente et tous les bassins à faible pourcentage de forêt ont des coefficients de variation des débits maximums élevés.

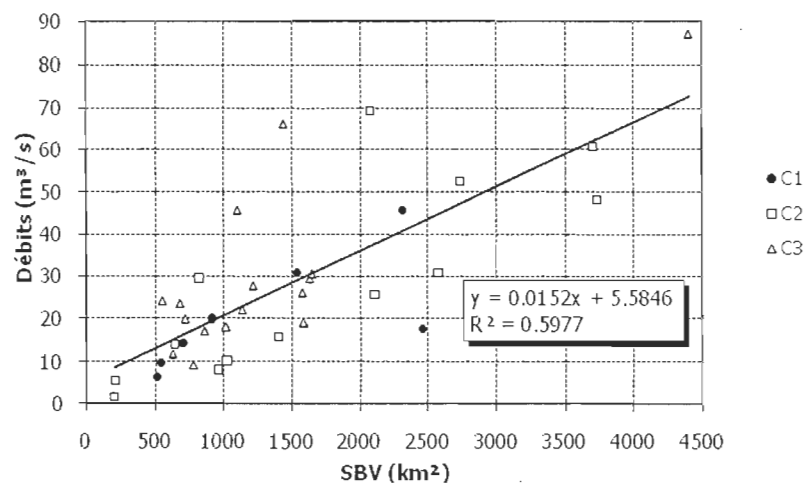


FIGURE 4.1 Droite de proportionnalité des débits maximums en fonction de SBV pour la période juillet-août. C1 : bassins à PF inférieur à 60 %, C2 : bassins à PF entre 60 et 90 % et C3 : bassins à PF égal ou supérieur à 90%

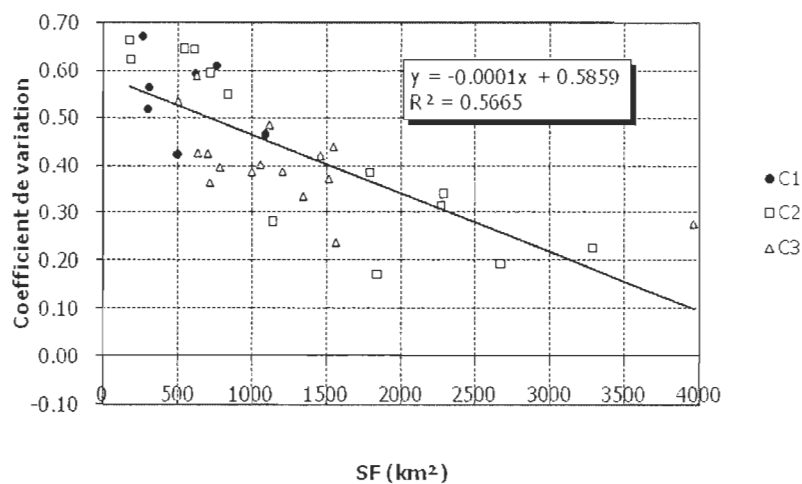


FIGURE 4.2 Droite de proportionnalité des coefficients de variation des débits maximums en fonction de SF durant la période septembre-octobre. C1 : bassins à PF inférieur à 60 %, C2 : bassins à PF entre 60 et 90 % et C3 : bassins à PF égal ou supérieur à 90%

## 4.2. VARIABILITÉ TEMPORELLE

### 4.2.1. Corrélation sérielle

Les valeurs de quotient de variance permutative des caractéristiques de débits de crue sont présentées aux figures 4.3, 4.4 et 4.5. Presque toutes les caractéristiques de débits ont des valeurs de QVP supérieures à  $QVP_c$  (0.802). Ceci révèle que peu de caractéristiques des débits de crues ont été affectées par une corrélation sérielle (tableau 4.4).

En comparant les valeurs de QVP en fonction de la couverture forestière sur le bassin, il ressort que celle-ci n'a aucune influence sur la dépendance des termes de séries des débits de crue. Comme signalé précédemment, les bassins à faible couvert forestier ne sont pas plus affectés par la corrélation sérielle que ceux qui ont un couvert forestier important.

De la comparaison de ces résultats en fonction des saisons, il ressort qu'aucune de ces trois périodes ne possède beaucoup plus de séries affectées par une corrélation sérielle. Pendant la période de mai à juin, la magnitude des débits maximums est la série la plus affectée par la corrélation sérielle. Au cours de la période de septembre à octobre, la série la plus affectée par la corrélation sérielle est la variabilité interannuelle de la date d'occurrence de la magnitude des débits maximums.

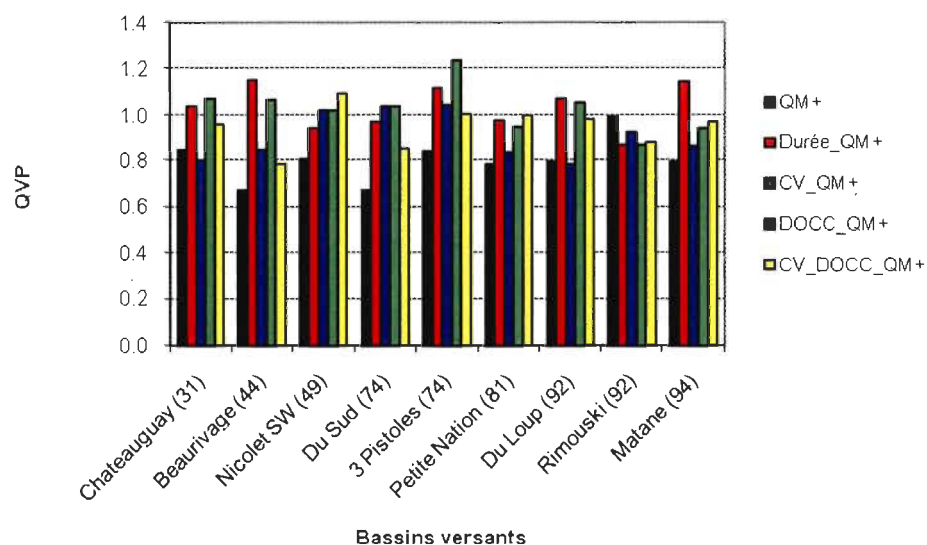


FIGURE 4.3 Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits de crue pour la période mai-juin

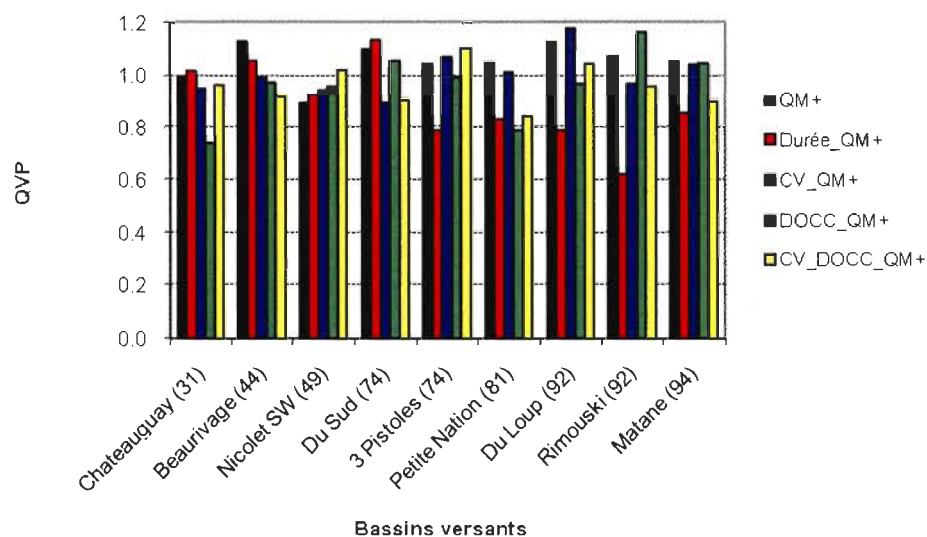


FIGURE 4.4 Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits de crue pour la période juillet-août

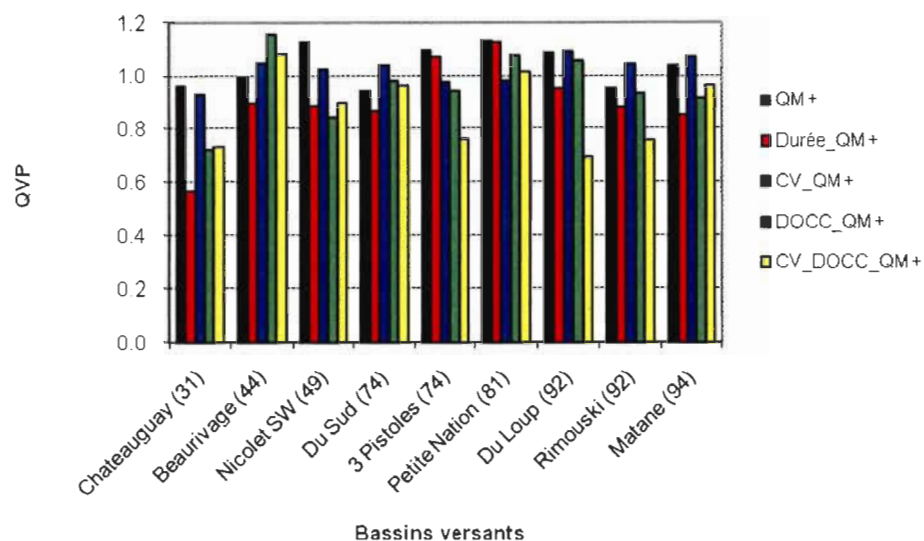


FIGURE 4.5 Quotient de variance permutative des caractéristiques des débits de crue pour la période septembre-octobre

TABLEAU 4.4  
Caractéristiques des débits de crue affectées par la corrélation sérielle

Saison	Bassin	Caractéristiques
Période 1	Beaurivage	$Q_M^+$ , $CV_{DOCC\_Q_M^+}$
	Du Sud	$Q_M^+$
	Petite Nation	$Q_M^+$
	Du Loup	$Q_M^+$ , $CV_{Q_M^+}$
	Matane	$Q_M^+$
Période 2	Châteauguay	$DOCC\_Q_M^+$
	Petite Nation	$DOCC\_Q_M^+$
	Du Loup	$Durée\_Q_M^+$
	Rimouski	$Durée\_Q_M^+$
Période 3	Châteauguay	$Durée\_Q_M^+$ , $DOCC\_Q_M^+$ , $CV_{DOCC\_Q_M^+}$
	3 Pistoles	$CV_{DOCC\_Q_M^+}$
	Du Loup	$CV_{DOCC\_Q_M^+}$
	Rimouski	$CV_{DOCC\_Q_M^+}$

#### 4.2.2. Analyse de tendance : Test de Mann-Kendall

Les résultats du test de Mann-Kendall et de régression linéaire sont résumés au tableau 4.5. Les figures 4.6 à 4.8 présentent quelques exemples des courbes qui découlent du calcul du test de Mann-Kendall et de l'ajustement de la régression linéaire.

En ce qui concerne les caractéristiques des débits de crue, on observe que la série des dates d'occurrence de la magnitude est la plus affectée : elle est croissante et décroissante de juillet à août mais décroissante de septembre à octobre. Par ailleurs, la magnitude est croissante de mai à juin et la variabilité des dates d'occurrence de la magnitude est décroissante de septembre à octobre.

Quant aux saisons, on n'observe aucune influence sur la tendance. Durant les deux dernières saisons (juillet-août et septembre-octobre), le nombre de rivières affectées par une tendance significative est le même, même si leur composition change légèrement d'une saison à l'autre. De plus, la série des dates d'occurrence de la magnitude est la seule caractéristique affectée par une tendance pendant la seconde période (juillet-août).

Enfin, en ce qui concerne le couvert forestier, ce facteur n'affecte pas la variabilité temporelle des caractéristiques des débits de crue. Aucune différence n'a été observée entre les rivières en fonction de leur couvert forestier.

L'analyse spatiale de ces rivières révèle que ce sont les rivières de la rive sud qui sont principalement affectées par une tendance.

Les années d'occurrence de ces changements montrent qu'à part les séries des dates d'occurrence de la magnitude de la Petite Nation et de variabilité des dates d'occurrence de la magnitude de Rimouski dont la



décroissance aurait commencé avant 1934, pour les deux autres caractéristiques de débits, les changements sont survenus après 1950.

**TABLEAU 4.5**  
**Caractéristiques des débits de crue ayant démontré de tendance significative**

Saison	Bassin	Caractéristiques	Tendance	Année d'occurrence
Période 1	Matane	$Q_M^+$	Croissante	1977
Période 2	Châteauguay	$DOCC_{Q_M^+}$	Croissante	1966
	Petite Nation	$DOCC_{Q_M^+}$	Décroissante	-
Période 3	Châteauguay	$DOCC_{Q_M^+}$	Décroissante	1950
	Rimouski	$CV_{DOCC_{Q_M^+}}$	Décroissante	-

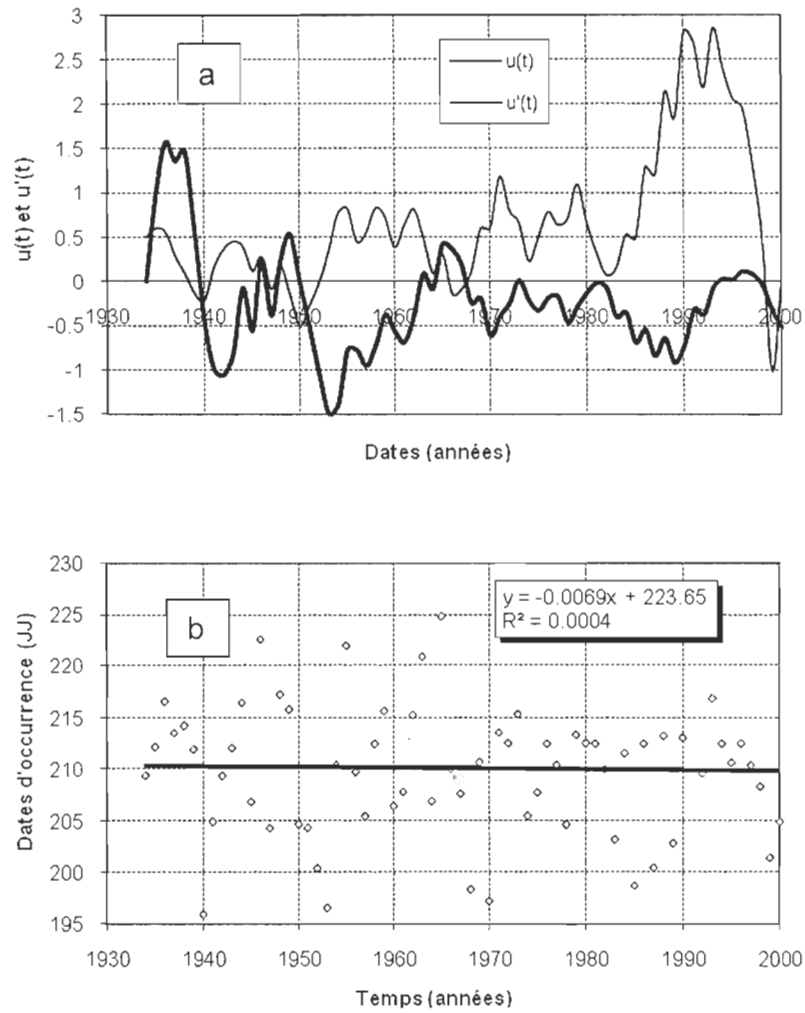


FIGURE 4.6 Dates d'occurrence des débits maximums du bassin Beaurivage de la période juillet-août de 1934 à 2000 : a) Valeurs progressives des statistiques  $u(t)$  et  $u'(t)$  et b) Droite de proportionnalité

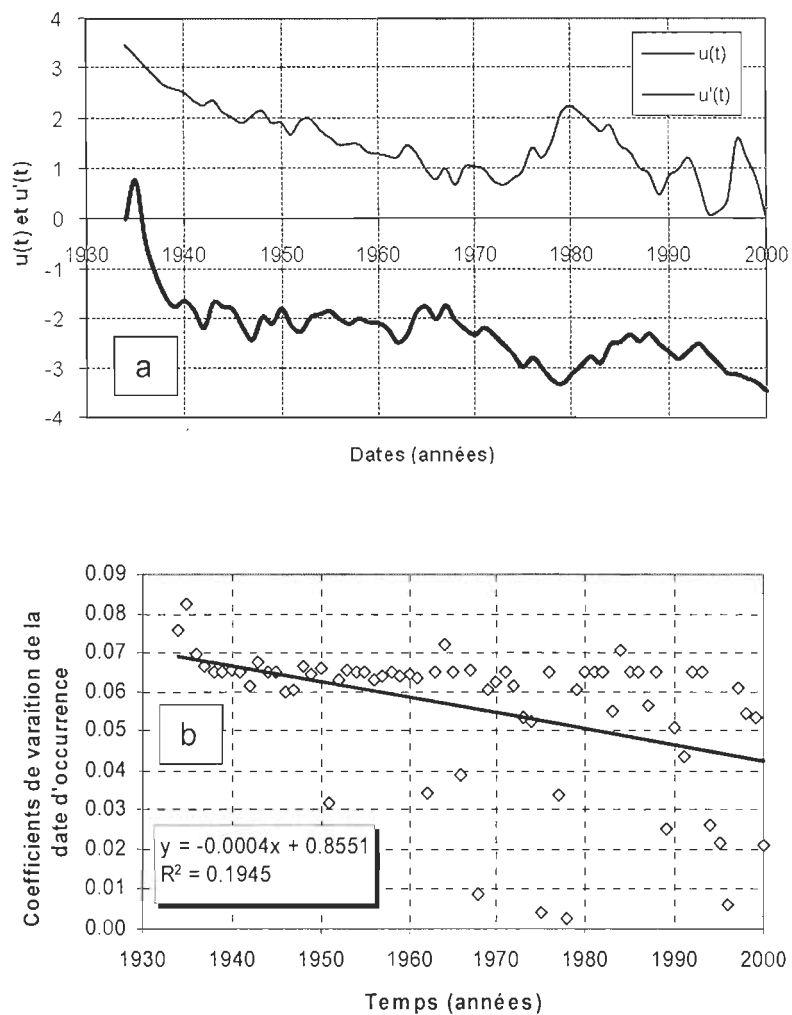


FIGURE 4.7 Coefficients de variation des dates d'occurrence des débits maximums de la période juillet-août du bassin Beaurivage de 1934 à 2000 : a) Valeurs progressives des statistiques  $u(t)$  et  $u'(t)$  et b) Droite de proportionnalité

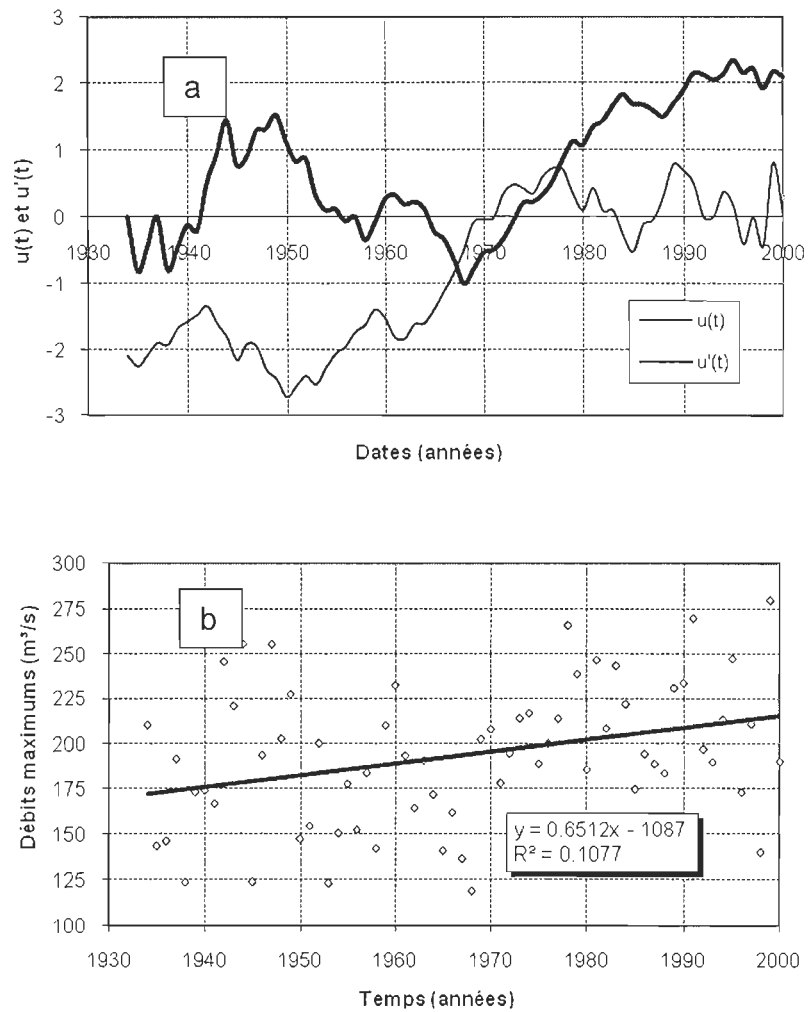


FIGURE 4.8 Débits maximums de la période mai-juin du bassin Matane de 1943 à 2000 :  
 a) Valeurs progressives des statistiques  $u(t)$  et  $u'(t)$  et  
 b) Droite de proportionnalité

### 4.2.3. Les Copules

#### 4.2.3.1. *Degré de dépendance entre les caractéristiques des débits de crue*

Comme énoncé précédemment, il y a dépendance entre deux séries des caractéristiques de débits lorsque le tau de Kendall dépasse 0.16 en valeur absolue. Ce sont les mêmes couples des séries analysées ci-haut pour les neuf rivières qui ont été encore prises en considération dans cette partie de notre étude.

Les valeurs du tau de Kendall sont consignées dans le tableau 4.6. De ce dernier, on observe les faits importants suivants : pour ce qui est des caractéristiques des débits de crue, il existe une dépendance significative entre la magnitude et sa durée d'une part, et entre la magnitude et sa variabilité (coefficient de variabilité) d'autre part, et ce pour les neuf rivières analysées. Cependant, la magnitude est très peu corrélée à sa période d'occurrence et suffisamment corrélée à la variabilité de celle-ci. Les valeurs de tau de Kendall sont quasiment positives pour tous les couples. En ce qui concerne les saisons, on observe que les valeurs de tau de Kendall sont globalement plus élevées pour les deux dernières périodes (juillet-août et de septembre-octobre) que pendant la première période (mai-juin) pour le couple magnitude et sa durée. En revanche, pour le couple magnitude et sa variabilité, ces valeurs sont globalement plus élevées durant les deux premières périodes que durant la dernière période et pour le couple magnitude et la variabilité de sa période d'occurrence, ces valeurs sont moyennement élevées dans l'ensemble de toutes les neuf rivières durant la dernière période. Enfin, pour ce qui est du couvert forestier, ce facteur n'a aucune influence sur les valeurs de tau de Kendall. Ce faisant, aucune différence n'est observée entre les bassins versants à couvert forestier élevé et ceux à couvert forestier faible.

**TABLEAU 4.6**  
**Force de dépendance entre les caractéristiques des débits de crue**

<b>Bassins</b>	<b>Saisons</b>			<b>Dépendance entre <math>Q_{M+}</math> et</b>
	<b>Période 1</b>	<b>Période 2</b>	<b>Période 3</b>	
Châteauguay (31)	0.4175	0.5884	0.5405	<b>Durée_ <math>Q_{M+}</math></b>
Beaurivage (44)	0.2944	0.4943	0.4663	
Nicolet SW (49)	0.3677	0.5016	0.5251	
Du Sud (74)	0.3948	0.4129	0.4328	
3 Pistoles (74)	0.2031	0.5830	0.4491	
Petite Nation (81)	0.3541	0.6735	0.8697	
Du Loup (92)	0.0909	0.4301	0.5658	
Rimouski (92)	0.0972	0.4962	0.5730	
Matane (94)	0.2221	0.3813	0.5197	
Châteauguay (31)	0.3641	0.2293	0.3523	<b>DOCC_ <math>Q_{M+}</math></b>
Beaurivage (44)	0.1208	0.3297	-0.0755	
Nicolet SW (49)	0.1832	0.1334	0.0113	
Du Sud (74)	0.0231	0.1280	0.0384	
3 Pistoles (74)	0.0529	0.1696	0.0222	
Petite Nation (81)	0.2754	0.2818	0.6056	
Du Loup (92)	-0.1280	0.1171	0.0855	
Rimouski (92)	0.0330	0.2157	0.1949	
Matane (94)	0.0095	0.1018	-0.0276	
Châteauguay (31)	0.6554	0.6762	0.5586	<b>CV_ <math>Q_{M+}</math></b>
Beaurivage (44)	0.5052	0.5459	0.5197	
Nicolet SW (49)	0.6517	0.5848	0.2763	
Du Sud (74)	0.5142	0.5332	0.4645	
3 Pistoles (74)	0.5061	0.6816	0.5323	
Petite Nation (81)	0.7494	0.3822	0.4699	
Du Loup (92)	0.4600	0.7467	0.6490	
Rimouski (92)	0.1588	0.6092	0.5088	
Matane (94)	0.6038	0.6472	0.5351	
Châteauguay (31)	0.3370	0.2411	0.5188	<b>CV<sub>DOCC_</sub> <math>Q_{M+}</math></b>
Beaurivage (44)	0.1379	0.2583	0.2773	
Nicolet SW (49)	0.2438	0.2935	0.5929	
Du Sud (74)	0.0457	0.0294	0.2583	
3 Pistoles (74)	0.0873	0.2203	0.4120	
Petite Nation (81)	0.3921	0.3017	0.6843	
Du Loup (92)	-0.1027	0.3234	0.1940	
Rimouski (92)	0.1343	0.2573	0.3460	
Matane (94)	0.1705	0.0213	0.4039	

#### 4.2.3.2. Modélisation de la dépendance entre les caractéristiques des débits maximums

Dans le tableau 4.7 sont donnés les modèles de copules sélectionnés pour la dépendance des caractéristiques des débits de crues. On remarque que les dépendances entre la magnitude et les autres caractéristiques de débits peuvent être généralement modélisées par plusieurs distributions.

Pour ce qui est des saisons, presque toutes les dépendances significatives de la magnitude aux autres caractéristiques des débits de crue peuvent être modélisées par une multitude de distributions pour toutes les trois périodes.

Enfin, la couverture forestière n'a pas d'influence sur les modèles de copules : il n'y a pas de différence sur le type et le nombre de distributions entre les bassins versants à couvert forestier élevé et ceux à couvert forestier faible.

**TABLEAU 4.7**  
**Modèles de copules sélectionnées pour la dépendance des caractéristiques des débits de crue**

<b>Bassins</b>	<b>Saisons</b>			<b>Q<sub>M</sub>- et</b>
	<b>Période 1</b>	<b>Période 2</b>	<b>Période 3</b>	
Châteauguay	Toutes sauf 7, 8	3, 5, 10, 12, 13	4, 5, 9, 11, 12, 13	<b>Durée_ Q<sub>M</sub>-</b>
Beaurivage	Toutes sauf 6, 8	Toutes sauf 6, 7, 8, 10	Toutes sauf 6, 7, 8	
Nicolet SW	1, 2, 9, 11	Toutes sauf 6, 7, 8	4, 5, 10	
Du Sud	1, 2, 9, 11, 12	Toutes sauf 6, 7, 8	Toutes sauf 6, 7, 8	
3 Pistoles	Toutes sauf 3, 8	Toutes sauf 2, 6, 7, 8, 9	1, 2, 3, 4, 10, 11, 12	
Petite Nation	1, 2, 9, 12, 13	5	5, 8, 10, 12, 13	
Du Loup	-	Toutes sauf 1, 6, 7, 8	1, 3, 5, 9, 10, 11, 12, 13	
Rimouski	-	1, 2, 4, 9, 10, 12, 13	Toutes sauf 6, 7, 8	
Matane	1, 2, 3, 4, 7, 11, 12, 13	Toutes sauf 6, 7, 8	1, 3, 4, 5, 10, 11, 12, 13	

TABLEAU 4.7 (suite)

Bassins	Période 1	Période 2	Période 3	Q <sub>M</sub> - et
Châteauguay	Toutes sauf 2, 4, 6, 7, 8, 9	Aucune	13	CV_Q <sub>M</sub> -
Beaurivage	Toutes sauf 6, 7, 8	1, 3, 11	Toutes sauf 4, 6, 7, 8	
Nicolet SW	1, 3, 5, 11, 12, 13	1, 2, 11, 12, 13	1, 7	
Du Sud	1, 3, 11, 12, 13	Toutes sauf 6, 7, 8, 11	1, 2	
3 Pistoles	1, 2, 3, 11, 13	1, 12	Toutes sauf 6, 7, 8, 11	
Petite Nation	1, 3, 5, 10, 11, 12, 13	Toutes sauf 4, 6, 7, 8	1, 2, 3, 9, 10, 12, 13	
Du Loup	1, 2, 3, 11, 12	1, 3, 5, 10, 11, 12, 13	1, 11, 12, 13	
Rimouski	-	1, 3, 10, 11, 12, 13	1	
Matane	1, 3, 10, 11, 12, 13	1, 3, 5, 10, 11, 12, 13	1, 2, 3	
Châteauguay	Toutes sauf 7, 8	1, 2, 7, 10, 11, 12	1, 2, 3, 5, 9, 10, 11, 13	DOCC_Q <sub>M</sub> -
Beaurivage	Toutes sauf 8	Toutes sauf 6, 7, 8	-	
Nicolet SW	Toutes sauf 8, 9	-	-	
3 Pistoles	-	Toutes sauf 8	-	
Petite Nation	Toutes sauf 4, 8, 9, 10	Toutes sauf 5, 6, 8	1, 3, 5, 11, 12, 13	
Du Loup	-	-	1, 6, 12, 13	
Rimouski	-	Toutes sauf 8, 9	1, 2, 6, 7, 11, 12	
Châteauguay	Toutes sauf 6, 7, 8	2, 3, 7, 11, 12	1, 3, 4, 5, 10, 11, 12, 13	CV <sub>DOCC_Q<sub>M</sub></sub> -
Beaurivage	Toutes sauf 8	Toutes sauf 5, 6, 8, 9	Toutes sauf 6, 7, 8	
Nicolet SW	1, 2, 3, 5, 7, 12, 13	1, 2, 9, 11, 12, 13	3, 5, 10, 11, 13	
Du Sud	-	-	Toutes sauf 6, 8, 9	
3 Pistoles	-	1, 7, 10, 12, 13	Toutes sauf 6, 7, 8	
Petite Nation	1, 2, 3, 4, 9, 10, 12	Toutes sauf 7, 8	1, 3, 5, 10, 13	
Du Loup	-	1, 2, 3, 9, 11	Toutes sauf 8, 9	
Rimouski	-	2, 3, 7, 12, 13	Toutes sauf 6, 7, 8	
Matane	1, 2, 4, 5, 7, 10, 12, 13	-	Toutes sauf 1, 6, 7, 8, 12	



### 4.3. CONCLUSION

La magnitude et sa variabilité de débits des crues sont successivement corrélées durant la période de juillet-août et inversement corrélée au cours de la période septembre-octobre à la taille des bassins versants et la superficie de forêt. Ces deux corrélations ont un comportement non continu : elles ne se produisent pas pendant les trois saisons. Il s'ensuit que la magnitude de débits maximums des bassins à faible pourcentage de forêt augmente aussi bien que celle des bassins au pourcentage de forêt plus élevé. Par conséquent, les débits maximums ne sont pas influencés par le pourcentage du couvert forestier sur le bassin. Par ailleurs, nous avons observé que la variabilité de cette magnitude diminue lorsque le pourcentage du couvert forestier augmente. Le couvert forestier joue ainsi un rôle tampon en atténuant les fluctuations interannuelles de la magnitude des crues.

La corrélation sérielle et l'existence de tendance dans certaines séries de caractéristiques des débits de crues n'étant pas influencées par le pourcentage de la couverture forestière, il s'avère que le creusement des réseaux de drainage dans les bassins agricoles n'a pas provoqué une hausse des débits de crues.

La proportion de la couverture forestière sur le bassin n'a pas d'influence sur le degré de dépendance et les modèles de copules de la magnitude et les autres caractéristiques des débits de crues. Ceci signifie que les changements induits par le creusement des réseaux de drainage dans les bassins versants agricoles n'ont aucune incidence sur le degré de dépendance de la magnitude aux autres caractéristiques des débits de crues.

## **Chapitre V**

### **DISCUSSION ET CONCLUSION GÉNÉRALE**

Les effets de déforestation et autres types d'utilisation des sols font l'objet de nombreux travaux dans la littérature scientifique. Cependant, il subsiste toujours une controverse sur les conséquences de ces effets sur le cycle hydrologique, en particulier sur les débits extrêmes. Au Québec, ces effets ne sont pas encore analysés. L'objectif de ce travail était donc d'analyser ces effets pour combler cette lacune.

La qualité des résultats obtenus et les conclusions qui en découlent dépendent en partie des méthodes d'analyse et de la taille des bassins étudiés. Au chapitre deux, nous avons montré que les différentes méthodes utilisées jusqu'à présent présentaient chacune ses faiblesses et ses avantages. De plus, l'application de certaines de ces méthodes, considérées comme les plus performantes (méthode d'appariement ou méthode de bassin témoin et celle des bassins expérimentaux), est souvent confrontée à de nombreuses contraintes (financières, administratives, logistiques, matérielles, etc.) difficiles à surmonter. Dans le cadre de ce travail, il était impossible de les appliquer. Nous avons ainsi proposé une nouvelle approche basée sur la comparaison des bassins versants en fonction de leur couverture forestière. Cette approche avait prouvé son efficacité dans les études d'impacts des barrages au Québec (Assani et al., 2005, 2006, 2007; Lajoie et al., 2007). Il était donc important de tester cette efficacité dans un cadre comme celui des impacts de la couverture forestière et autres types d'utilisation des sols sur la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des débits extrêmes. Malgré les résultats qu'on peut qualifier de probants que nous avons obtenus, le désavantage de cette approche est sa très grande dépendance à la disponibilité de données des débits. En effet, il est difficile de travailler sur des bassins versants de très faibles superficies en raison de l'absence de données de débits. Le second

désavantage est le fait qu'en travaillant sur des bassins versants relativement grands, on ne peut pas s'assurer de l'homogénéité des conditions physiographiques susceptibles d'expliquer la variabilité spatio-temporelle des écoulements à l'intérieur d'un bassin versant. Enfin, le dernier désavantage de la méthode est le fait qu'il est impossible d'exclure totalement l'influence des autres facteurs sur la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des débits. L'interprétation des résultats doit se faire alors avec beaucoup de prudence et de perspicacité. Quoi qu'il en soit, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude pourraient éventuellement être validés ou invalidés par d'autres méthodes d'étude.

## **5.1. ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES DÉBITS EXTRÊMES**

La comparaison des caractéristiques des débits d'étiage en fonction de la couverture forestière de 36 bassins versants situés au Québec méridional nous a permis de mettre en évidence deux résultats importants.

1. La magnitude des débits minimums annuels diminue avec la régression de la couverture forestière.
2. La magnitude des débits maximums ne semble pas être influencée par le changement de la couverture forestière.

### **5.1.1. Magnitude des débits minimums extrêmes**

En ce concerne le premier résultat, il ressort des études sur les impacts du reboisement ou déboisement sur les débits d'étiage que le reboisement a tendance à réduire les débits d'étiage et le déboisement à les accroître (Banks et Kromhout, 1963; Bosch, 1979; Dons, 1986; Trimble et al., 1987; Smith et Scott, 1992; Gustard et Wesselink, 1993; Tallaksen, 1993; Bosch et Hewlett, 1982; Harr et al., 1982; Hetherington, 1982; Keppeler et Ziemer, 1990; Hicks et al., 1991; Smith, 1991; Andréassian, 2004a, 2004b). En d'autres termes, une diminution de la couverture forestière entraîne une hausse des débits

minimums. Cette diminution serait attribuée à celle de l'extraction de l'eau du sol par les arbres. En effet, la présence d'arbres favorise l'extraction de l'eau du sol qui est ensuite transpirée. Cette extraction réduit ainsi la quantité d'eau qui alimente les nappes (Calder, 2002). Nos résultats ne s'accordent pas avec ceux de la littérature. Rappelons, notre étude a mis en évidence une diminution des débits minimums lorsque la couverture forestière diminue.

Avant de proposer une explication pour justifier nos résultats, il est important de démontrer sur le plan hydrologique que cette diminution des débits minimums extrêmes ne peut être attribuée exclusivement qu'à la couverture forestière. Par conséquent, il faut démontrer que d'autres facteurs qui n'ont pas été pris en compte dans l'analyse statistique ne peuvent pas expliquer cette diminution des débits minimums extrêmes.

- La géologie. Les débits minimums extrêmes proviennent exclusivement des nappes aquifères. Par conséquent, le premier facteur qui influence ces débits est sans nul doute la nature pétrographique des roches dans lesquelles se forment les nappes aquifères. En effet, les rivières qui drainent les roches perméables (calcaires, sables, grès, etc.) ont des débits d'étiage plus élevés que celles qui coulent sur les roches imperméables ou semi-perméables (schistes, granites, argiles, etc.). Dans le cas de notre étude, les rivières qui ont des débits minimums extrêmes faibles sont toutes situées en rive sud, c'est-à-dire sur les roches plus perméables que celles de la rive nord. Par conséquent, ce facteur ne peut pas expliquer la diminution des débits minimums extrêmes observés au Québec.

- Les caractéristiques des sols. Le rôle des sols est d'influencer la quantité d'eau qui alimente les nappes aquifères. Un sol perméable favorise une infiltration beaucoup plus importante de l'eau qu'un sol imperméable. Dans le cas du Québec, il est bien connu que les rivières de la rive nord coulent sur un sol moins perméable que celles de la rive sud. Par conséquent, la diminution des

débits minimums extrêmes observée en rive sud ne peut être attribuée à une plus faible perméabilité des sols.

- Les précipitations. A conditions égales par ailleurs, les bassins versants qui reçoivent des précipitations plus importantes que d'autres ont des débits minimums extrêmes plus élevés. Dans leur étude, Assani et al. (2006) ont démontré que les précipitations sont globalement plus élevées en rive sud qu'en rive nord, probablement à cause de l'influence maritime. Par conséquent, la diminution des débits minimums extrêmes observée en rive sud ne peut être attribuée à une plus faible quantité des précipitations.

- Enfin, le régime hydrologique. Rappelons qu'au Québec, il existe deux périodes d'occurrence des débits minimums (Anctil et al., 2000): en hiver en raison des précipitations qui tombent sous forme de neige et en été en raison de la diminution de la quantité des pluies. Ces deux périodes sont observées aussi bien en rive nord qu'en rive sud. Par conséquent, ce facteur ne peut être invoqué pour rendre compte de la diminution des débits minimums annuels.

A la lumière de ces considérations, la diminution des débits minimums extrêmes observée en rive sud est due à celle de la couverture forestière. Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette diminution.

1. Un ruissellement de surface important en raison de la diminution de la couverture forestière empêchant ainsi une infiltration d'eau dans le sol. Ce ruissellement peut être exacerbé par le creusement de drains de drainage dans les bassins versants agricoles.

2. Une évaporation importante de l'eau dans le sol en raison de la disparition de la couverture forestière. Rappelons que la période analysée correspond exactement à celle où l'évaporation est la plus importante au Québec en raison de la hausse de la température.

### 5.1.2. Magnitude des débits maximums extrêmes

Pendant la période juillet-août, la magnitude des débits de crue de quelques bassins à faible pourcentage de forêt augmente aussi bien que celle des bassins à couvert forestier plus élevé. Ceci prouve que non seulement la magnitude des débits de crue n'est pas influencée par le pourcentage de forêt sur le bassin versant mais aussi c'est seulement en été qu'il existe une corrélation entre la magnitude des débits de crue et la taille de bassins versants. Cette corrélation ne permet pas d'établir l'influence du couvert végétal sur cette magnitude contrairement aux débits d'étiage. Dans le contexte du Québec, l'absence de l'influence de la régression du couvert végétal sur la magnitude des débits maximums annuels peut être expliquée par deux facteurs suivants.

- Les faibles pentes des bassins versants dans la zone agricole. Au Québec, comme nous l'avons déjà mentionné, le déboisement a été important dans les basses plaines de Saint-Laurent. Résultat de l'accumulation des sédiments dans la vallée du fleuve Saint-Laurent, ces plaines sont caractérisées par une morphologie quasi plate sur les deux rives du fleuve. Ce type de morphologie ne favorise pas le transfert rapide de l'eau des versants vers les vallées. Par conséquent, malgré le déboisement, les faibles pentes atténuent l'influence de ce facteur sur la magnitude des crues, et ce malgré le creusement de nombreux drains de drainage dans les bassins agricoles.

- La présence de nombreux lacs et marais, héritage des périodes glaciaires, dans les bassins versants. Ces lacs et marais constituent des zones de stockage des eaux de ruissellement réduisant ainsi le volume d'eau de ruissellement qui atteint les chenaux. Il en résulte ainsi une absence de corrélation entre la magnitude des crues et la diminution du couvert végétal.

Cette absence d'influence de la diminution du couvert végétal a été observée par plusieurs auteurs. Ceux-ci ont conclu à un lien faible entre la couverture du

sol et les crues (Hewlett et Helvey, 1970; Hewlett et Bosch, 1984; Kirby et al., 1991; Taylor et Pearce, 1982; Bruijnzeel et Bremmer, 1989). Les impacts de forêt sur les crues sont susceptibles d'être perceptibles seulement pour des événements mineurs et sur des petits bassins (La Marche et Lettenmair, 2001; Robinson et al., 2003; Sikka et al., 2003). Caissie et al. (2002) ont observé que l'effet de l'exploitation forestière sur le régime hydrologique d'un bassin pendant les crues était détecté sur la magnitude des débits de pointe en été.

### **5.1.3. Influence de la couverture forestière sur la variabilité spatiale des autres caractéristiques des débits extrêmes**

La plupart des travaux consacrés aux études des impacts de l'utilisation des sols en général et ceux du couvert végétal en particulier se sont limités quasi exclusivement à l'analyse de la magnitude des débits. Il existe ainsi encore très peu d'études sur les impacts de l'utilisation des sols sur les autres caractéristiques des débits extrêmes (Mount et al., 2005; Poff et al., 2006). Or, comme le stipule le concept écologique du « régime des débits naturels », les autres caractéristiques fondamentales des débits jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes fluviaux. Il est donc important d'analyser les impacts de l'utilisation des sols sur ces caractéristiques. En ce qui concerne les débits minimums, notre étude n'a révélé aucune corrélation significative entre le couvert forestier et les autres caractéristiques des débits. Quant aux débits maximums, une corrélation négative existe entre la variabilité des débits et la superficie couverte par les forêts. Toutefois, la méthode de proportionnalité n'a pas mis en évidence l'influence de la diminution du couvert végétal sur cette caractéristique. Ces résultats diffèrent de ceux de l'étude de Poff et al. (2006) réalisée aux États-Unis. Ces auteurs ont observé une hausse de la variabilité des débits associée à celle de la surface mise en culture.

## 5.2. ANALYSE DE LA VARIABILITÉ TEMPORELLE

Le couvert forestier sur le bassin versant s'est révélé n'avoir aucune influence sur la dépendance et la tendance des termes de séries des caractéristiques des débits d'étiages et de crues (certaines caractéristiques des bassins à faible couvert forestier sont aussi bien affectées par une corrélation sérielle et une tendance que celles de bassins à forte couverture forestière). D'où, le creusement des réseaux de drains dans les bassins versants agricoles vers les années 50-60 n'a pas provoqué une hausse des débits d'étiage. La plupart des changements ayant affecté certaines caractéristiques des débits d'étiage ont lieu après 1960. Ceci traduirait en fait l'influence climatique sur la variabilité temporelle des débits d'étiage. A ce propos, les travaux réalisés sur les débits moyens annuels et saisonniers ont mis en évidence deux changements survenus au Québec : en 1950 et en 1970 (Anctil et Coulibaly, 2004; Coulibaly et Burn, 2004; 2005). Quant aux débits de crue, l'analyse statistique de 16 rivières du Québec méridional n'a pas mis en évidence ces deux changements (Assani et al., soumis). L'étude réalisée sur le bassin de la rivière Chaudière entre 1970 et 1999 a montré un effet fort d'utilisation du sol, et plus spécialement l'utilisation agricole du sol, sur le régime hydrologique confirmant que ce facteur jouera un rôle clé à l'adaptation aux changements climatiques (Quilbé et al., 2008).



## BIBLIOGRAPHIE

- Albek M., Ögütveren U.B., Albek E. 2004. Hydrological modelling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF. *J. Hydrol.* 285: 260-271.
- Allan D.J., 1995. *Stream ecology :Structure and function of running waters.* Alden Press, Oxford, 388p.
- Anctil F., Rousselle J., Lauzon N. 2005. *Hydrologie : Cheminement de l'eau.* École Polytechnique de Montréal, 317p.
- Anctil F., Coulibaly P. 2004. Wavelet analysis of the interannual variability in southern Québec streamflow. *J. Clim.*, 17: 163-173.
- Andréassian V., 2004a. Waters and forests : from historical controversy to scientific debate. *J. Hydrol.* 291: 1-27.
- Andréassian V., 2004b. Couvert forestier et comportement hydrologique des bassins versants. *La Houille blanche* 2: 31-35.
- Archer D., 2003. Scale effects on the hydrological impact of upland afforestation and drainage using indices of flow variability : the River Irthing, England. *Hydrology and Earth System Sciences* 7: 325-338.
- Archer D.R., Newson M., 2002. The use of indices of flow variability in assessing the hydrological and instream habitat impacts of upland afforestation and drainage, *J. Hydrol.* 268: 244-258.
- Assani A.A. (article soumis). The ecological "natural flow regime" paradigm and the rebirth Penck's potamology. *Earth Sciences Reviews*.
- Assani A.A. (article soumis). Relationship between AMO and interdecadal variability of strong flood flows in the St. Lawrence watershed in Québec (Canada) over the past century. *J. Hydrol.*
- Assani A.A., Lajoie F., Laliberté C. 2007. Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec. *Revue des Sciences de l'Eau* 20 : 127-146.
- Assani A.A., Lajoie F., Vadnais M.-E., Benseghir S., Bureau C. 2006. Modes de variabilité temporelle des débits moyens annuels et leurs liens avec les indices climatiques au Québec (Canada). *Géographie Physique et Quaternaire*, Vol. 60, N° 3 (sous presse).

- Assani A.A., Lajoie F., Laliberté C. 2006a. Comparaison des impacts des barrages sur les débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants. *Revue des Sciences de l'Eau* (à la presse).
- Assani A.A., Tardif S., Lajoie F. 2006b. Statistical analysis of factors affecting the spatial variability of annual minimum flow characteristics in a cold temperate continental region (southern Québec, Canada). *J. Hydrol.* 328: 753-763.
- Assani A.A., Stichelbout É., Roy A.G., Petit F. 2006c. Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Québec (Canada). *Hydrol. Process.* 20: 3485-3501.
- Assani A.A., Gravel E., Buffin-Bélanger T., Roy, A.G. 2005. Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada). *Revue des Sciences de l'Eau*, 18 : 103-127.
- Auteuil C., Dubois J.-M. 1994. Érosion des berges et stabilisation par les végétaux. Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Bulletin de recherche n° 113-114, 94p.
- Aylward B. 2005. Land use, hydrological function and economic evaluation. *International Hydrology Series: Forests, Water and People in the Humid Tropics*, Unesco, Cambridge University Press, pp. 100-117.
- Banks C.H. 1961. The hydrological effects of riparian and adjoining vegetation, *For. S. Afr.* 1, 31-46.
- Banks C.H., Kromhout C. 1963. The effect of afforestation with *Pinus radiata* on summer baseflow and total annual discharge from Jonkershoek catchments. *For. S. Afr.* 3, 43-65.
- Baron J.S., Hartman M.D., Kittel T.G.F., Band L.E., Ojima D.S., Lammers R.B. 1998. Effects of land cover, water redistribution, and temperature on ecosystem processes in the south platte basin. *Ecological Applications*, 8, 1037-1051.
- Bélanger L., Grenier M., Deslandes S., Bossé D. 1999. Bilan des habitats et de l'occupation du sol dans le sud du Québec. Environnement Canada, Service canadien de la faune, région du Québec.
- Bérard J. 1996. Manuel de foresterie. Presses de l'Université Laval, Sainte-Foy, Québec, 1428p.

- Berryman D., Giroux I. 1994. Qualité de l'eau : La contamination des cours d'eau par les pesticides dans les régions de culture intensive de maïs au Québec (1992-1993). Ministère de l'environnement et de la faune du Québec, Direction des écosystèmes aquatiques, Envirodoq EN940594, Rapport n° PES-4, 134p.
- Blöschl G., Ardoin-Bardin S., Bonnel M., Dörninger M., Goodrich D., Gutknecht D., Matamoros D., Merz B., Shand P., Szolgay J. 2007. At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? *Hydrol. Process.* 21, 1241-1247.
- Bosch, J.M. 1979. Treatment effects on annual and dry period streamflow at Cathedral Park. *S. Afr. For. J.* 108, 29-38.
- Bosch, J.M., Hewlitt, J.D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.* 55, 3-23.
- Bravard J-P, Petit F. 2000. Les cours d'eau : Dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris, 222p.
- Brousseau M., Pelletier D.L. 1994. Destinations : Québec – Canada. Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., Ottawa, 576p.
- Brown A.E., Zhang L., McMahon T.A., Western, A.W., Vestessy, R.A. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *J. Hydrol.* 310: 28-61.
- Bruijnzeel L.A., 2004. Hydrological functions of tropical forests : not seeing the soil for trees? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 185-228.
- Bruijnzeel L.A., Bremmer C.N. 1989. Highland-lowland interactions in the Ganges-Brahmaputra river basin: A review of Published Literature. ICIMOD Occasional Paper, N° 11.ICIMOD.
- Bruland G.L., Hanchey M.F., Richardson C.J. 2003. Effects of agriculture and wetland restoration on hydrology, soils, and water quality of a Carolina bay complex. *Wetlands Ecology and Management* 11, 141-156.
- Bultot F., Dupriez G.L., Gellens D. 1990. Simulation of land use changes and impacts on the water balance – a case study for Belgium. *J. Hydrol.* 114, 327-348.
- Buytaert W., De Bièvre B., Wyseure G., Deckers, J. 2004. The use of linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. *Hydrol. Earth Syst. Sc.* 8, 108-114.

- Calder I.R., 2002. Forests and Hydrological Services: Reconciling public and science perceptions. *Land Use and Water Resources Research* 2, 2.1-2.12.
- Calder I.R. 1993. Hydrologic effects of land-use change. *Handbook of hydrology*, McGraw-Hill, Inc. New York, chap. 13
- Caissie D., Jolicoeur S., Bouchard M., Poncet E. 2002. Comparison of streamflow between pre and post timber harvesting in Catamaran Brook (Canada). *J. Hydrol.* 258 : 232-248.
- Chang M. 2006. *Forest hydrology : An Introduction to Water and Forests*. 2<sup>nd</sup> ed. Taylor & Francis, Boca Raton, FL (USA), 474p.
- Cosandey C. 2003. *Les eaux courantes*. Éditions Belin, Paris, 240p.
- Cosandey C. 1995. La forêt réduit-elle l'écoulement annuel ? *Annales de Géographie* 581-583: 7-25.
- Costa M.H., Botta A., Cardille J.A. 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *J. Hydrol.* 283: 206-217.
- Coulibaly P., Burn D.H. 2005. Spatial and temporal variability of Canadian seasonal streamflows. *J. Clim.* 18: 191-210.
- Coulibaly P., Burn D.H. 2004. Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows. *Water Resources Research*, 40: 1-14.
- Degoutte G. 2006. *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : hydraulique et morphologie fluviales appliquées*. Éditions TEC & DOC, Paris, 394p.
- De Michele C., Salvadori G. 2003. A Generalized Pareto intensity-duration model of storm rainfall exploiting 2-Copulas. *J. Geophys. Res.*, 108(D2), 4067, doi:10.1029/2002JD002534.
- De Michele C., Salvadori G., Canossi M., Petaccia A., Rosso R. 2004. Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway, *J. Hydrol. Eng.*, in press.
- Dons, A. 1986. The effect of large-scale afforestation on Tarawera river flow. *J. Hydrol.* 25, 61-73.
- De Roo A., Odijk M., Schmuck G., Koster E., Lucieer A. 2001. Assessing the effects of land use changes on floods in the Meuse and Oder catchment. *Phys. Chem. Earth (B)* 26, 593-599.

- Dye P.J. 1996a. Climate, forest and streamflow relationships in South African afforested catchments. *Commonwealth Forestry Review*, 75(1) : 31-38.
- Environnement Canada, 2000. Hydat CD-ROM: Données sur les eaux de surface et les sédiments jusqu'en 1998.
- Favre A.-C., El Adlouni S., Perreault L., Thiémonge N., Bobée B. 2004. Multivariate hydrological frequency analysis using copulas. *Water Resources Research* 40: W01101.
- Fernandez C., Vega J.A., Gras J.M., Fonturbel T. 2006. Changes in water yield after a sequence of perturbations and forest management practices in a *Eucalyptus globules* Labill. watershed in Northern Spain. *Forest Ecology and Management* 234: 275-281.
- Forsyth T. 2005. Land use impacts on water resources – Science, Social and Political Factors. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, vol. 5: 2911-2924
- Genest C., Rémillard B., Beaudouin D. 2008. Goodness-of-fit tests for copulas: A review and a power study. *Insurance: Mathematics and economics* 42 (sous presse).
- Genest C., Favre A.-C., 2007. Everything you always wanted to know about copula modelling but were afraid to ask. *J. Hydrol. Eng.* 12(4): 347-368.
- Genest C., Quessy J.-F., Rémillard B. 2006. Goodness-of-fit procedures for copula models based on the probability integral transformation. *Scandinavian Journal of Statistics* 33, 337-366.
- Gerten D., Schaphoff S., Haberlandt U., Lucht W., Sitch S. 2004. Terrestrial vegetation and water balance – hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *J. Hydrol.* 286 : 249-270.
- Gerstengarbe F.-W., Werner P.C., 1999. Estimation of the beginning and end recurrent events within a climate regime. *Climate Research* 11: 97-107.
- Giroux I. 1999. Qualité de l'eau : Contamination de l'eau par les pesticides dans les régions de culture de maïs et de soya au Québec. Ministère de l'Environnement, Direction des écosystèmes aquatiques, Campagnes d'échantillonnage 1996, 1997 et 1998, Envirodoq EN990149, 29p. + 5 annexes.
- Giroux I. 1998. Qualité de l'eau : Suivi environnemental des pesticides dans les régions de vergers de pommiers. Rapport d'échantillonnage de petits cours d'eau et de l'eau souterraine au Québec en 1994, 1995 et 1996, Envirodoq EN980361, 21p. + 3 annexes.

- Giroux I., Duchemin M., Roy M. 1997. Qualité de l'eau : Contamination de l'eau par les pesticides dans les régions de culture intense de maïs au Québec (1994-1995). Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des écosystèmes aquatiques, Envirodoq EN970527, 54p. + 6 annexes.
- Giroux I. 1993. Contamination de l'eau souterraine par l'aldicarbe dans les régions de culture intensive de pommes de terres de 1984 à 1991. Ministère de l'environnement, Bibliothèque Nationale du Québec, 61p. + 2 annexes.
- Gosselin B., Hayart G., Vézina S. 1986. La dégradation des sols agricoles au Québec : causes, effets, prévention et correction. Conseil des productions végétales du Québec, Bibliothèque Nationale, Bulletin technique 13, 147p.
- Gratton L. 1989. L'utilisation des plantes ligneuses dans la stabilisation des berges en milieu agricole. Ministère du Loisir, de la chasse et de la Pêche, 61p.
- Gray D.M. 1972. Manuel des principes d'hydrologie pour l'avancement de l'hydrologie canadienne. Comité national canadien de la décennie hydrologique internationale, Ottawa
- Grosclaude G. (coordinateur) 1999. L'eau : Milieu naturel et maîtrise (Tome I). Institut National de la Recherche Agronomique, Paris.
- Gustard, A., Wesselink, A. 1993. Impact of land use change on water resources: Balquidder catchments. J. Hydrol. 145, 389-401.
- Haché M., Ouarda T.B.M.J., Bruneau P., Bobée B. 2002. Estimation régionale par la méthode de l'analyse canonique des corrélations: comparaison des types de variables hydrologiques. Can. J. Civ. Eng. 29 : 899-910.
- Harr, R.D., Levno, A., Mersereau, R. 1982. Streamflow changes after logging 130-Year-old Douglas fir in two small watersheds. Water Resour. Res. 18, 637-644.
- Hernandez M., Miller S.N., Goodrich D.C., Goff B.F., Kepner W.G., Edmonds C.M., Jones K.B. 2000. Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. Environmental Monitoring and Assessment 64: 285-298.
- Hetherington E.D. 1982. Effects of forest harvesting on the hydrologic regime for carnation creek experimental watershed: a preliminary assessment. Proceedings of the Canadian Hydrological Symposium 82, pp. 247-267,
- Hewlett J.D., Bosch J.M. 1984. The dependence of storm flows on rainfall intensity and vegetal cover in South Africa. J. Hydrol., 75: 365-381.

- Hewlett J.D., Helvey J.D. 1970. Effects of forest clearfelling on the storm hydrograph. *Water Resour. Res.* 6, 768-782.
- Hicks B.J., Beschta R.L., Harr J.D. 1991. Long-term changes in streamflow following logging in western Oregon and associated fisheries implication. *Water Resour. Bull.* 27(2), 217-226.
- Hope R.A., Jewitt G.P.W., Gowing J.W. 2004. Linking the hydrological cycle and rural livelihoods: a case study in the Luvuvhu catchment, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 1209-1217.
- Jewitt G. 2005. Water and Forests. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, vol. 5, 2895-2902.
- Jones J.A., Grant G.E. 1996. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resour. Res.* 32, 959-974.
- Kendall M.G. 1975. *Rank Correlation Measures*. Charles Griffin, London.
- Keppeler E.T., Ziemer L.L. 1990. Logging effects on streamflow: water yield and summer low flows at Caspar Creek in north-western California. *Water Resour. Res.* 26, 1669-1679.
- Kiersch B., Tognetti S., Land-water linkages in rural watersheds : Results from the FAO electronic workshop. *Land Use and Water Resources Research* 2: 1.1-1.6.
- Kim T.-W., Valdés J.B., Yoo S. 2003. Nonparametric approach for estimating return periods of droughts in arid regions. *Journal of Hydrologic Engineering* 8, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699 (2003)8: 5(1).
- Kirby C., Newson M.D., Gilman K. 1991. *Plynlimon Research: The First Two Decades*, Institute of (Wallingford) Hydrology Report, N°109, Institute of (Wallingford) Hydrology, p. 188.
- Koro N., 1993. Effets des niveaux de résidus de cultures sur le ruissellement et la perte en sol et en phosphore en conditions simulées. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maîtrise ès Sciences (M.Sc.), Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec.
- Lajoie F., Assani A., Roy A.G., Mesfioui M. 2007. Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons. *J. Hydrol.* 334, 423-439.

- La Marche J., Lettenmair D.P. 2001. Effects of forest roads on flood flows in the Deschutes River, Washington. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 115-134.
- Langevin R., Plamondon A. P., 2004. Méthode de calcul de l'aire équivalente de coupe d'un bassin versant en relation avec le débit de pointe des cours d'eau dans la forêt à dominance résineuse. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de l'environnement forestier et Université Laval, Faculté de foresterie et de géomatique, code de diffusion, 24p.
- Langevin R., 2004. Objectifs de protection ou de mise en valeur des ressources du milieu aquatique : Importance au Québec des augmentations des débits de pointe des cours d'eau attribuables à la récolte forestière, Québec, gouvernement du Québec, ministère des ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de l'environnement forestier, code de diffusion, 13p.
- Laurencelle L., 2001. Hasard, nombres aléatoires et méthode Monte Carlo. Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, Québec, 264p.
- Laurencelle L. 1993. 9<sup>e</sup> Lettre Statistique. Université du Québec à Trois-Rivières, 133p.
- Laurencelle L. 1983. 7<sup>e</sup> Lettre Statistique. Université du Québec à Trois-Rivières, 66p.
- Lee H.-S., 2007. Multivariate analysis : Canonical correlation analysis using small number of samples. *Communications in statistics-Simulation and Computation* 36: 973-985.
- Lee S.H., Choi S., 2007. Two-Dimensional Canonical Correlation Analysis. *IEEE Signal Processing Letters* 14(10): 735-738.
- Libiseller C., 2002. MULTMK/PARTMK – A program for the computation of multivariate and partial Mann-Kendall test. <http://www.mai.liu.se/~cllib/welcome/PMKtest.html>
- Mahe G., Paturel J.-E., Servat E., Conway D., Dezetter A. 2005. The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. *Journal of Hydrology* 300: 33-43.
- Mann, H.B., 1945. Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13 : 245-259.
- Mann H.B. 1945. Nonparametric test against trend. *Econometrica* 13, 245-259.



- Meier K.B., Brodie J.R., Schulze R.E., Smithers J.C., Mnguni D. 1997. Modelling the impacts of riparian zone alien vegetation on catchment water resources using the ACRU model. Proceedings of the Eighth South African National Hydrology Symposium, Pretoria, South Africa, 13 pp.
- Ministère de l'Environnement (MEQ), 2003. Synthèse des informations environnementales disponibles en matière agricole au Québec. Direction des politiques du secteur agricole.
- Mount N.J., Sambrook Smith G.H., Stott T.A. 2005. An assessment of the impact of upland afforestation on lowland river reaches: the Afon Trannon, mid-Wales. *Geomorphology* 64, 255-269.
- Moussa R., Voltz M., Andrieux P. 2003. Impacts of various scenarios of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions* 278: 417-421.
- Mussy A., Higy C. 2004. *Hydrologie: Une science de la nature*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 314p.
- National Research Council, 1991. *Opportunities in Hydrologic Sciences*. Academy Press, Washington DC, 348p.
- Newson M., 1994. *Hydrology and the River Environment*, Oxford University Press.
- Niehoff D., Fritsch U., Bronstert A. 2002. Land-use impacts on storm-runoff generation : scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *J. Hydrol.* 267: 80-93.
- Ogasawara H. 2007. Asymptotic expansions of the distributions of estimators in canonical correlation analysis under normality. *Journal of Multivariate Analysis* 98:1726-1750.
- Ott B., Uhlenbrook S. 2004. Quantifying the impact of land-use changes at the event and seasonal time scale using a process-oriented catchment model. *Hydrology and Earth System Sciences* 8: 62-78.
- Penman H.L. 1963. *Vegetation and the atmosphere*. Technical Communication N° 53. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, UK, p.124.
- Poff N.L., Bledsoe B.P., Cuhaciyan C.O. 2006. Hydrologic variation with land use across the contiguous United States : Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. *Geomorphology* 79 (3-4): 264-285.

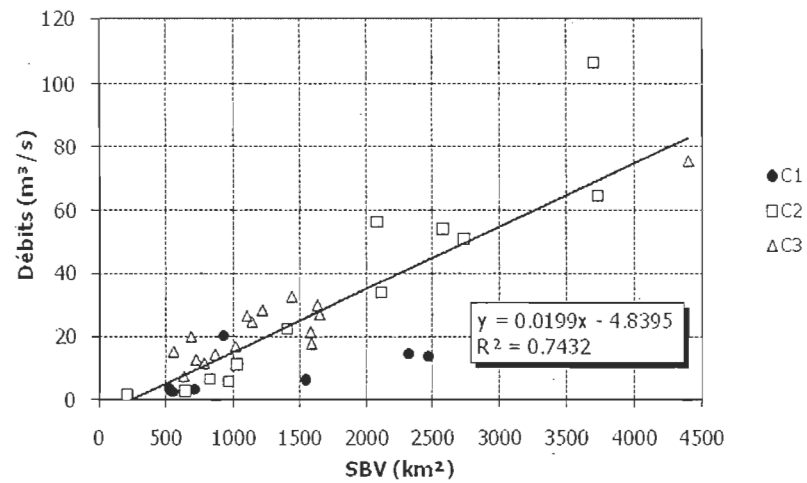
- Quessy J.-F., Mesfioui M., Toupin M.-H. 2007. On a new goodness-of-fit process for families of copulas. Article soumis.
- Quilbé R., Rousseau A.N., Moquet J.-S., Savary S., Ricard S., Garbouj M.S. 2008. Hydrological responses of watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 101-110.
- Rallison R.E., 1982. Evaluation and assessment of agriculture impacts on hydrology. *Studies and Reports in Hydrology Issue 32*: 345-362.
- Richter B.D., Baumgartner J.V., Powell J., Braun D.P. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology* 10: 1163-1174.
- Riggs H.C. 1976. Effects of man on low flows. *Proceedings of the Conference on Environment, Aspects Irrigation and Drainage*, University of Ottawa, American Society of Civil Engineers, New-York, pp. 306-314.
- Roberge J. 1996. Qualité de l'eau: Impacts de l'exploitation forestière sur le milieu hydrique. Ministère de l'environnement et de la Faune du Québec, Direction des écosystèmes aquatiques, Envirodoq EN960189, 68p. + annexe.
- Roberts G., Harding R.J., 1996. The use of simple process-based models in the estimate of water balances for mixed land use catchments in East Africa. *J. Hydrol.* 180: 251-266.
- Robinson M., Dupeyrat A., 2005. Effects of commercial timber harvesting on streamflow regimes in the Plynlimon catchments, mid-Wales. *Hydrol. Process.* 19 : 1213-1226.
- Robinson M., Cognard-Plancq A.-L., Cosandey C., David J., Durand P., Führer H.-W., Hall R., Hendriques M.O., Marc V., McCarthy R., McDonnell M., Martin C., Nisbet T., O'Dea P., Rodger M., Zollner A. 2003. Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows : a European perspective. *Forest Ecology and Management*, 186: 85-97.
- Robinson M., Gannon B., Schuch M., 1991. A comparison of the hydrology of moorland under natural conditions, agriculture use and forestry. *Hydrological Sciences Journal* 36(6): 565-575.
- Rowe P.B. 1963. Streamflow increases after removing woodland-riparian vegetation from a southern California watershed. *For. J.* 61, 365-369.

- Salvadori G., De Michele C. 2004. Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events. *Water Resour. Res.* 40: W12511.
- Schulze R.E. 1979. Hydrology and water resources of the Drakensberg. Natal Town and Regional Planning Reports, Durban, South Africa, vol. 42.
- Serrano S.E., Whiteley H.R., Irwin R.W. 1985. Effects of agriculture drainage on streamflow in the Middle Thames River, Ontario, 1949-1980. *Can. J. Civ. Eng.* 12: 875-885.
- Sikka A.K., Samra J.A., Sharda V.N., Samraj P., Lakshmanan V. 2003. Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globules*) in Nilgiris watersheds of South India. *J. Hydrol.* 270: 1-2.
- Siriwardena L., Finlayson B.L., McMahon T.A. 2006. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. *J. Hydrol.* 326: 199-214.
- Smakhtin, V.U. 2001. Low flow hydrology : a review. *J. Hydrol.*, 240: 147-186.
- Smith, R.E. 1991. Effect of clearfelling pines on water yield in a small eastern Transvaal catchment, South Africa. *Water SA* 17, 217-224.
- Smith R.E., Bosch J.M. 1989. A description of the Westfalia catchment experiment to determine the effect on water yield of clearing the riparian zone and converting an indigenous forest to a *Eucalyptus* plantation. *S. Afr. For. J.* 151, 26-31.
- Smith R.E, Scott D.F. 1992. Effects of afforestation on low flows in various regions of South Africa. *Water SA* 18, 185-194.
- Smithers J.C., Schulze R.E. 1994. The Dehoek/Ntabamhlope hydrological research catchments 1974 to 1994. Department of Agricultural Engineering, Agriculture Catchments Research Unit, Report N 42, 127pp.
- Sneyers R. 1975. Note technique n°143 sur l'analyse statistique des séries d'observations. Secretariat de l'Organisation Météorologique Mondiale, Genève, 192p.
- Stednick J.D. 1996. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *J. Hydrol.* 176: 79-95.

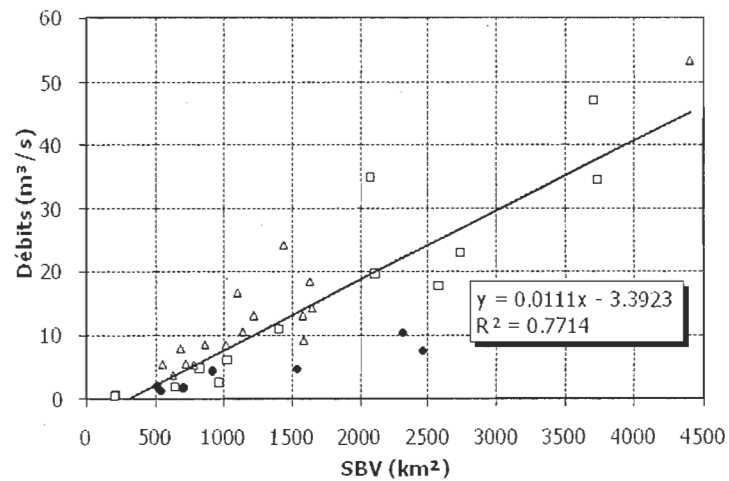
- Swank W.T., Swift, J.R., Douglas, J.E. 1988. Streamflow changes associated with forest cutting, species conversion and natural disturbance. In: Swank, W.T., Crossley, D.A. (Eds), *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta. Ecological Studies 66*. Springer, New York, pp. 297-312.
- Tallaksen L.M. 1993. Modelling land use change effects on low flows. In: Gustard, A. (Ed.), *FRIEND. Vol I: Hydrological Studies*. Institute of Hydrology, Wallingford, UK, pp. 56-68.
- Taylor C.H., Pearce A.J. 1982. Storm runoff processes and sub-catchments characteristics in a New Zealand hill country catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7: 439-447.
- Thanapakpawin P., Richey J., Thomas D., Rodda S., Campbell B., Logsdon M. 2006. Effects of landuse change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand. *J. Hydrol.* 334 (1-2): 215-230.
- Trimble S.W., Weinich F.H., Hoag B.L. 1987. Deforestation and the reduction of water yield on the Southern Piedmont since circa 1940. *Water Resour. Res.* 23, 425-437.
- Viramontes D., Descroix L., 2002. Modifications physiques du milieu et conséquences sur le comportement hydrologique des cours d'eau de la Sierra Madre occidentale (Mexique). *Rev. Sc. Eau* 15: 493-513.
- Watson F., Vertessy R.A., Grayson R.B. 1999. Large-scale modelling of forest hydrological processes and their long-term effect on water yield. *Hydrol. Process.* 13: 689-700.
- Wei W., Chen L., Fu B., Huang Z., Wu D., Gui L. 2007. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *J. Hydrol.* 335, 247-258.
- Wei X., Liu S., Wang C. 2005. Hydrological processes in major types of Chinese forest. *Hydrol. Process.* 19: 63-75.
- Westmacott J.R., Burn D.H. 1997. Climate change effects on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson River Basin. *J. Hydrol.* 202: 263-279.
- Wilgen B.W., van Little P.R., Chapman R.A., Görgens A.H.M., Willems T., Marais C. 1997. The sustainable development water resources: History, financial costs and benefits of alien plant control programmes. *S. Afr. J. Sci.* 93, 404-411.
- Wilk J., Andersson L., Plermkamon V. 2001. Hydrological impacts of forest conversion to agriculture in a large river basin in northeast Thailand. *Hydrol. Process.* 15: 2729-2748.

- Yagouti A., Boulet G., Vescovi L. 2006. Homogénéisation des séries des températures et analyse de la variabilité spatio-temporelle de ces séries au Québec Méridional. Ouranos, Montréal (Québec), Rapport n° 4, 140p.
- Yue S., Wang C.Y. 2002. The influence of serial correlation on the Mann-Whitney test for detecting a shift in median. *Advances in Water Resources* 25, 325-333.
- Yue S., Pilon P., Cavadias G. 2002. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol.* 259: 254-271.
- Ziegler A.D., Giambelluca T.W., Vana T.T., Nullet M.A., Fox J., Tran D.V., Pitthong J., Maxwell J.F., Evett S. 2004. Hydrological consequences of landscape fragmentation in mountains northern Vietnam: evidence of accelerated overland flow generation. *J. Hydrol.* 287, 124-146.

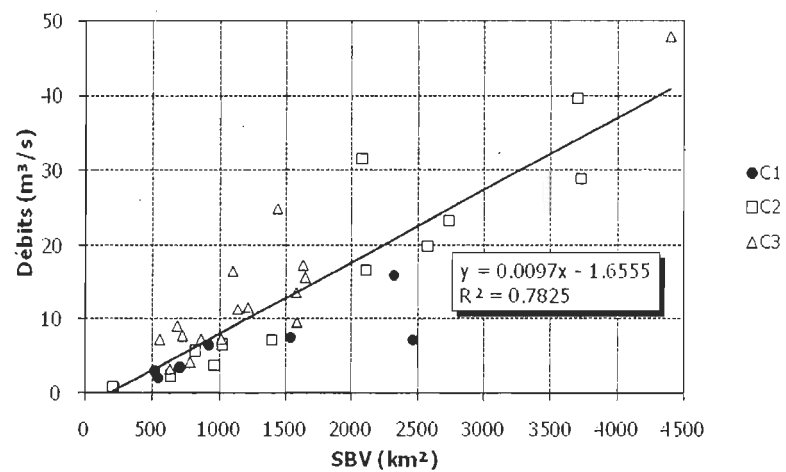
## ANNEXES



ANNEXE A1 Droite de proportionnalité des débits minimums en mai-juin en fonction de SBV



ANNEXE A2 Droite de proportionnalité des débits minimums en juillet-août en fonction de SBV



ANNEXE A3 Droite de proportionnalité des débits minimums en septembre-octobre en fonction de SBV

**ANNEXE A4 Sélection des modèles de copules pour la dépendance magnitude-durée des débits d'étiage en juillet-août de la Petite Nation**

MODÈLE	$\theta$	STATISTIQUES	VALEUR DE P
CLAYTON	3.2895	KK = 0.1739 SS = 0.7220 CC = 8.6840	0.0070 0.0000 0.0000
A.-M.-H.	1.0000	KK = 0.6105 SS = 1.0581 CC = 7.4796	0.0000 0.0000 0.0000
FRANK	8.5403	KK = 0.0636 SS = 0.7300 CC = 8.8292	0.4190 0.0000 0.0000
GUMBEL A	1.0000	KK = 0.3333 SS = 1.0359 CC = 8.2451	0.0060 0.0000 0.0000
<u>GUMBEL B</u>	<u>0.6219</u>	<u>KK = 0.0766</u> SS = 0.8116 CC = 8.9457	<u>0.2470</u> 0.0000 0.0000
GALAMBOS	0.2213	KK = 1.6768 SS = 2.0080 CC = 6.6495	0.0450 0.0450 0.0450
CUADRAS-AUGÉ	3.2895	KK = 0.6083 SS = 0.5753 CC = 9.7058	0.0000 0.0000 0.0000
DURANTE A	0.0010	KK = 0.2946 SS = 0.4808 CC = 0.0871	0.0000 0.0000 0.0280
DURANTE B	0.9990	KK = 1.0363 SS = 1.4570 CC = 7.1731	0.0000 0.0000 0.0000
<u>FRÉCHET</u>	<u>0.6928</u>	<u>KK = 0.0417</u> SS = 0.9057 CC = 8.6417	<u>0.6100</u> 0.0000 0.0000
<u>F.-G.-M</u>	<u>2.7985</u>	<u>KK = 0.1243</u> SS = 0.8010 CC = 8.2634	<u>0.3280</u> 0.0000 0.0000
PLACKETT	8.5245	KK = 0.3072 SS = 0.9161 CC = 8.0716	0.0490 0.0000 0.0000
<u>NORMALE</u>	<u>0.8287</u>	<u>KK = 0.0902</u> SS = 0.7658 CC = 8.9849	<u>0.1450</u> 0.0000 0.0000



**ANNEXE A5 Sélection des modèles de copules pour la dépendance magnitude-durée des débits de crue en juillet-août de la Petite Nation**

MODÈLE	$\theta$	STATISTIQUES	VALEUR DE P
CLAYTON	4.1247	KK = 0.9301 SS = 0.5017 CC = 0.8619	0.0000 0.0000 0.0000
A.-M.-H.	1.0000	KK = 1.0555 SS = 1.0917 CC = 0.6585	0.0000 0.0000 0.0000
FRANK	10.2867	KK = 0.1502 SS = 0.4394 CC = 0.9605	0.0100 0.0000 0.0000
GUMBEL A	1.0000	KK = 0.5054 SS = 0.7753 CC = 0.8515	0.0000 0.0000 0.0000
<u>GUMBEL B</u>	<u>0.6735</u>	KK = 0.0653 SS = 0.4934 CC = 0.9677	<u>0.3010</u> 0.0000 0.0000
GALAMBOS	0.2410	KK = 2.3803 SS = 1.8523 CC = 0.6877	0.0440 0.0440 0.0440
CUADRAS-AUGÉ	4.1247	KK = 0.5599 SS = 0.3456 CC = 1.1563	0.0000 0.0000 0.0000
DURANTE A	0.0010	KK = 0.3927 SS = 0.9065 CC = 4.9416	0.0000 0.0000 0.0000
DURANTE B	0.9990	KK = 0.9221 SS = 1.0654 CC = 0.7585	0.0000 0.0000 0.0000
FRÉCHET	0.7379	KK = 0.1755 SS = 0.6056 CC = 0.9474	0.0000 0.0000 0.0000
F.-G.-M	3.0305	KK = 0.2828 SS = 0.5763 CC = 0.8519	0.0160 0.0000 0.0000
PLACKETT	10.3314	KK = 0.4186 SS = 0.7230 CC = 0.7799	0.0060 0.0000 0.0000
NORMALE	0.8713	KK = 0.1787 SS = 0.4892 CC = 0.9782	0.0000 0.0000 0.0000